This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

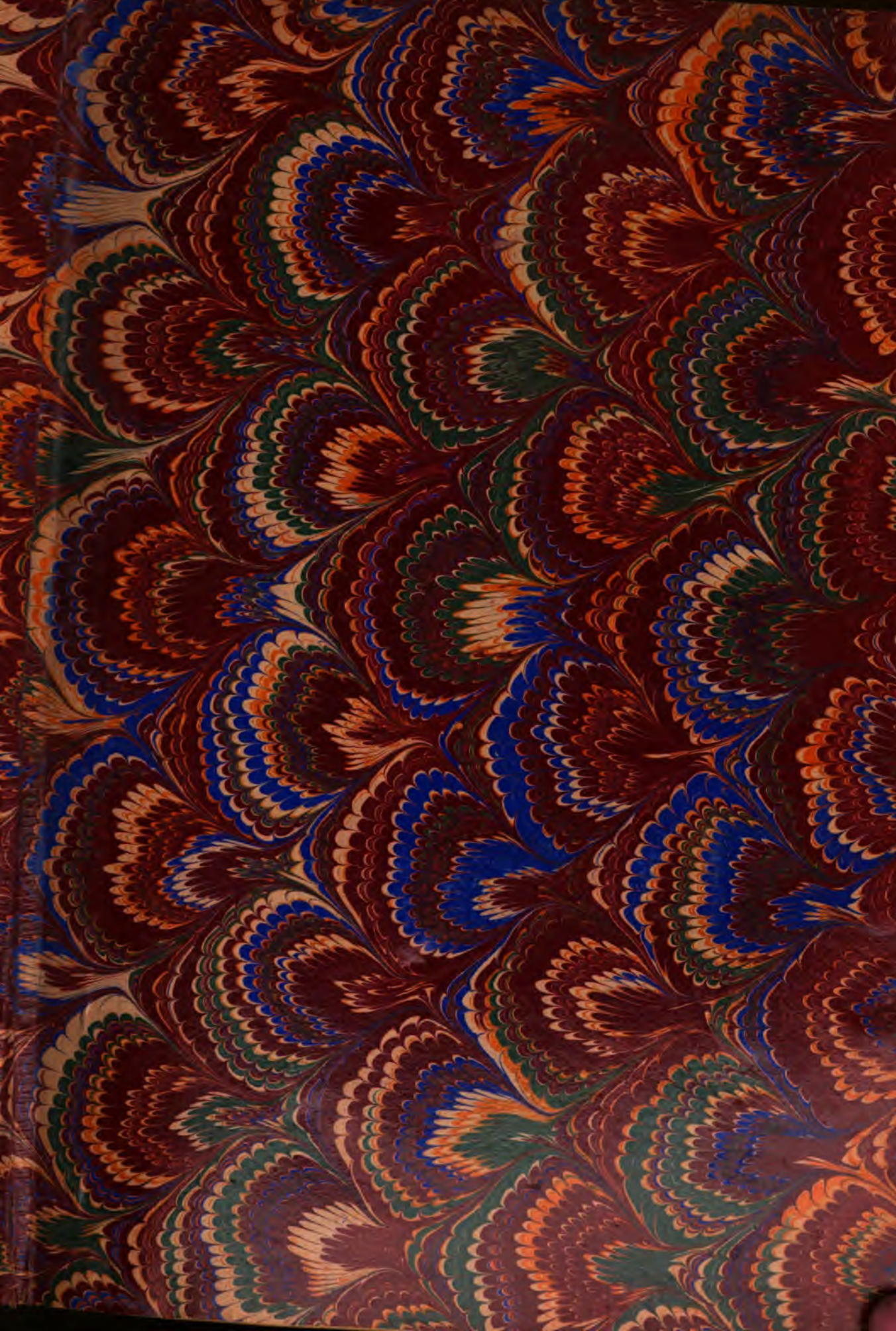
À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

GODFREY LOWELL CABOT SCIENCE LIBRARY
of the Harvard College Library

This book is
FRAGILE
and circulates only with permission.
Please handle with care
and consult a staff member
before photocopying.

Thanks for your help in preserving
Harvard's library collections.



TRAITÉ PRATIQUE

DE LA

MACHINE LOCOMOTIVE

TRAITÉ PRATIQUE

DE LA

MACHINE LOCOMOTIVE

CONTENANT

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX RELATIFS A L'ÉTUDE ET A LA CONSTRUCTION
DES LOCOMOTIVES,
LA DESCRIPTION DES TYPES LES PLUS RÉPANDUS,
L'ÉTUDE DE LA COMBUSTION, DE LA PRODUCTION ET DE L'UTILISATION DE LA VAPEUR,
DU RENDEMENT, DES CONDITIONS DE FABRICATION
ET DE RÉCEPTION DES MATÉRIAUX,
DES PROPORTIONS ET DU MODE DE CONSTRUCTION DES ORGANES,

PAR

MAURICE DEMOULIN
Ingénieur des Arts et Manufactures

OUVRAGE PRÉCÉDÉ D'UNE INTRODUCTION

PAR

ÉDOUARD SAUVAGE
Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines

973 figures et planches dans le texte — 6 planches hors texte.

TOME DEUXIÈME

PARIS
LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET Cie, ÉDITEURS
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15
MAISON A LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE

1898
Tous droits réservés.

AUG 1 1 1898
LIBRARY.

TRAITÉ PRATIQUE

DE LA

MACHINE LOCOMOTIVE

DEUXIÈME PARTIE

COMBUSTION. — VAPORISATION. — UTILISATION DE LA VAPEUR RENDEMENT

CHAPITRE PREMIER

COMBUSTION ET VAPORISATION

PRODUCTION ET RENDEMENT DE LA CHAUDIÈRE LOCOMOTIVE
LEURS VARIATIONS MUTUELLES
CONDITIONS PROPRES A ASSURER LE MAXIMUM D'EFFET UTILE

Le foyer considéré comme appareil de combustion.

Généralités sur la combustion. — De la combustion dans les foyers de locomotives. — Proportions des foyers. — Foyers profonds et foyers plats. — Degré d'imperfection de la combustion. — Différents modes de chauffe. — Dispositions propres à améliorer la combustion. — Rentrées d'air. — Voûte en briques. — Foyer Ten Brinck. — Activité de la combustion; son rapport avec le tirage, le diamètre et la longueur des tubes; son influence sur le rendement. — Différents combustibles.

La chaudière considérée comme appareil d'échange de chaleur et de production de vapeur.

Surface de chauffe directe, indirecte, totale. — Transmission de la chaleur à travers les parois. — Quantité de vapeur fournie par les surfaces de chauffe. — Répartition de la chaleur totale. — Emploi des tubes à ailettes; résultats comparatifs. — Influence de l'intensité du tirage sur la production de vapeur et sur l'utilisation économique. — Influence de la longueur des tubes sur le rendement. — Influence de la réduction du nombre des tubes. — Conditions pratiques d'une bonne vaporisation. — Conclusions sur la capacité de production et l'utilisation économique de la chaudière locomotive.

66. Importance du rôle de la chaudière. — La chaudière est l'âme de la locomotive, la source d'énergie d'où elle dérive vie et mouvement, l'organe vital par excellence dont la capacité et l'endurance mesurent la puissance ou l'efficacité de ce moteur. C'est à la création d'une chaudière à la fois légère et puissante que la locomotive a dû son existence, c'est grâce au développement

de cette même chaudière qu'elle a pu se prêter aux exigences sans cesse croissantes de l'exploitation. Le progrès, pour la locomotive, a surtout consisté depuis l'origine dans l'augmentation de la puissance de sa chaudière; les organes du mécanisme et du véhicule n'ont subi aucune modification de principe, ils se sont simplement développés ou perfectionnés parallèlement, les premiers pour utiliser la plus grande quantité de vapeur produite, les seconds pour supporter avec sécurité et transporter le poids de plus en plus grand du moteur à des vitesses de plus en plus élevées.

A vrai dire, la chaudière locomotive n'a pas encore atteint la limite qui lui est assignée par les conditions rigoureuses qui président à son établissement mais il est difficile pour le moment d'aller jusque-là; on ne peut en effet considérer la locomotive indépendamment de la voie qui la supporte, toutes deux doivent marcher de pair.

Il nous suffira pour le moment de constater que la locomotive n'a pas encore dit son dernier mot, qu'elle est encore dans une période intermédiaire de développement. Nous verrons d'ailleurs qu'au point de vue de l'accroissement de la vitesse, le côté intéressant de la question et qui demande encore beaucoup d'étude, consiste moins dans l'accroissement absolu de la puissance, d'ailleurs relativement facile à réaliser, que dans l'augmentation de la puissance par unité de poids.

67. Dans les chaudières fixes, on doit avant tout rechercher à obtenir un régime économique aussi avantageux que possible dût-on accroître notablement le pòids. La locomotive ayant, en plus du train qu'elle remorque, à se traîner elle-même, la puissance par unité de poids devient au contraire la qualité primordiale qu'on puisse lui donner surtout si l'on a en vue le remorquage des trains rapides. Or, nous le verrons, la chaudière locomotive, en même temps que légère, est économique, mais on peut, on doit même parfois, sacrifier dans une certaine mesure son utilisation pour accroître sa puissance.

L'économie réalisée par exemple par l'emploi de tubes très longs ne compense pas en général l'augmentation du poids de la machine et la diminunution de la puissance maximum. Une chaudière lourde et volumineuse pourra présenter un rendement calorifique élevé, le rendement total en travail utile au crochet de traction se trouvant au contraire assez bas. Si on réduit dans une proportion convenable la surface de chauffe et le poids de la chaudière, l'utilisation calorifique pourra être plus faible, mais le rendement total sera plus élevé que dans le cas précédent. Au delà d'une certaine proportion, on perdrait beaucoup plus en utilisation thermique que l'on ne gagnerait en utilisation mécanique. D'autre part, si la machine est peu économique, la consommation d'eau et de charbon sera plus grande et par conséquent le poids du tender en charge sera plus considérable.

Cette question présente, on le voit, une certaine complication et l'on doit, en ce qui la concerne, n'agir qu'avec circonspection. Il est préférable de se maintenir entre les deux extrêmes représentés l'un par la machine un peu faible pour son service, légère, surmenée et par conséquent peu économique, et la machine trop lourde mais d'utilisation thermique élevée.

La question du prix d'établissement et d'entretien doit d'autre part intervenir également dans le choix des proportions à adopter qui dépendent ainsi de facteurs d'espèces très différentes et dont aucun ne se trouve négligeable. Vers la solution d'un tel problème, on ne saurait être sûrement guidé que par les indications de la pratique, seules capables de faire apprécier le résultat final. Une étude purement théorique de la question, outre qu'elle est fort difficile, pourrait avoir l'inconvénient de faire négliger certains côtés accessoires, ce qui fausserait les conclusions.

D'ailleurs, d'une Compagnie à l'autre, entre celles mêmes appartenant à différentes contrées, on ne relève plus de différences aussi grandes qu'autrefois dans les proportions et le poids des chaudières de locomotives par unité de poids de vapeur produit. Les chaudières des machines anglaises par exemple, à tubes courts et nombreux, fonctionnant avec un charbon de très bonne qualité et un fort tirage, se trouvaient en tête d'une série dont les anciennes locomotives à tubes longs usitées par quelques Compagnies françaises occupaient l'autre extrémité. Les premières présentaient à poids égal une plus grande activité de vaporisation; à puissance égale, elles étaient plus légères. Depuis, on a assez généralement reconnu en France que les tubes très longs ne présentaient pas, sous le rapport économique, des avantages capables de contre-balancer l'augmentation de poids et la réduction d'élasticité qu'ils entraînaient. Aussi, les chaudières des types récents ont-elles en général des tubes moins longs que les anciennes; l'adoption des tubes à ailettes a beaucoup contribué à cette transformation.

En somme, la chaudière locomotive est un appareil dont on doit chercher à tirer le meilleur parti aussi bien en ce qui concerne son rendement qu'en ce qui a trait à son utilisation commerciale et pratique. On doit chercher à disposer les surfaces de chauffe de manière qu'elles satisfassent à ce double desideratum, et à proportionner convenablement et sans exagération la surface de grille au travail à produire.

68. La chaudière, organisme beaucoup plus parfait que la machine proprement dite, a pour but d'effectuer, à l'eau qu'elle contient, la transmission de la chaleur emmagasinée dans le charbon et dégagée par sa combustion, afin de la rendre susceptible de transformation en travail mécanique. On doit donc chercher, pour obtenir un rendement aussi élevé que possible, à disposer son foyer et ses surfaces actives de manière que :

1° La combustion soit aussi parfaite que possible, c'est-à-dire que le combustible fournisse le maximum de calorique dont il est susceptible;

2° Que ce calorique dégagé soit aussi intégralement que possible transmis à l'eau de la chaudière.

Dans son application à la locomotive, la chaudière doit en outre satisfaire à des conditions spéciales, que nous exposons ailleurs, et présenter une grande légèreté, c'est-à-dire être capable, sous un faible volume, de permettre le dégagement, la mise en œuvre et l'utilisation d'une grande quantité d'énergie calorifique.

Nous devrons donc examiner, sans toutefois suivre nécessairement l'ordre ci-dessous, la chaudière et le foyer au point de vue

(*a*). Du rendement de l'*appareil de combustion;*

(*b*). Du rendement de l'*appareil d'échange de chaleur ;*

(*c*). De l'*intensité de la production ;*

(*d*). Des *actions mutuelles* des diverses conditions d'établissement et de fonctionnement.

De très nombreuses expériences ont été effectuées dans ces dernières années sur les chaudières locomotives et ont permis de constituer, par les résultats concordants et précis qu'elles ont donné, un corps de doctrine qui semble dès maintenant reposer sur des bases stables.

Nous ne pouvons énumérer tous ces essais ni rendre un compte détaillé des résultats qu'ils ont donné, ni même de ceux, moins nombreux qui, effectués sur place avec des chaudières dont on pouvait faire varier les éléments (longueur ou nombre des tubes ; surface de grille, etc.) ont permis d'étendre les observations à un grand nombre de cas.

Nous nous contenterons de citer ceux qui ont été entrepris par la Compagnie de *P.-L.-M.*, de 1885 à 1890, sous la direction de MM. les ingénieurs en chef A. Henry et Ch. Baudry, et qui ont été conduits dans un esprit remarquable de méthode et de précision[1] et ceux également fort intéressants de M. Goss, à l'Université technique de Purdue (États-Unis). Les expériences de ce genre permettent de suivre les variations de la production et du rendement en fonction de celles des éléments des chaudières locomotives ou des conditions de leur fonctionnement, tandis que les résultats relevés en service leur servent de vérification.

[1] *Étude expérimentale de la vaporisation dans les chaudières des locomotives* faite sous la direction de M. A. Henry, ingénieur en chef des Mines, ingénieur en chef du matériel et de la traction de la compagnie P.-L.-M. ; *Annales des Mines*, livraison d'août 1894.

LE FOYER CONSIDÉRÉ COMME APPAREIL DE COMBUSTION

69. Généralités sur la combustion. — Nous ne reprendrons pas ici l'étude générale de la combustion qui est traitée dans les ouvrages de physique industrielle[1] et qui fait partie du programme des Écoles spéciales. Nous nous bornerons à rappeler les conditions nécessaires pour obtenir une bonne combustion, à examiner comment elles se trouvent réalisées dans les foyers de locomotives et à étudier les principaux dispositifs appliqués dans la pratique pour les améliorer.

Les conditions classiques, nécessaires pour obtenir une bonne combustion, les mêmes pour tous les combustibles, sont au nombre de trois :

1° Faire affluer sur le combustible l'air en proportion convenable. Si le volume d'air est insuffisant, la combustion est forcément incomplète; s'il est en excès, la température s'abaisse. En pratique, il est préférable d'assurer une combustion parfaite et d'envoyer un léger excès d'air ;

2° Mélanger intimement l'air et les gaz combustibles afin de déterminer les contacts nécessaires à la combinaison ;

3° Maintenir une température assez élevée dans le foyer. Un refroidissement excessif peut empêcher la combinaison des gaz avec l'oxygène de l'air. Une température très considérable a aussi des inconvénients, nous le verrons.

Or, dans les foyers de locomotives comme dans les autres, il est rare que ces conditions soient complètement remplies et que la combustion soit complète, bien qu'il y ait souvent un excès d'air. Il se perd presque toujours en dehors une certaine quantité de gaz combustibles tandis que de nombreuses escarbilles incandescentes et incomplètement brûlées sont entraînées vers la boîte à fumée. Ces conditions ne peuvent même être strictement remplies, si habilement que la chauffe soit conduite, parce que le chargement du foyer s'opérant par intermittence, le dégagement des gaz subit d'un moment à l'autre de grandes variations auxquelles l'afflux d'air n'est jamais bien proportionné.

Les poids d'air nécessaire à la combustion des principaux corps contenus dans les combustibles usuels sont donnés ci-dessous :

Corps combustible.	Produits.	Poids d'air par kg. de combustible.
Carbone	CO^2	11,59 kg.
—	CO	5,79 —
Oxyde de carbone	CO^2	2,48 —
Hydrogène	HO	34,78 —
C^2H^4	$2\,CO^2 + 4\,HO$	17,39 —
C^4H^4	$4\,CO^2 + 4\,HO$	14,90 —

[1] Nous recommandons particulièrement à ce sujet le *Traité de Physique Industrielle* de M. L. Ser (Masson) où toutes les questions relatives à la production et à l'utilisation de la chaleur sont étudiées très complètement, avec méthode et clarté.

Les chiffres contenus dans ce tableau permettent de calculer le poids ou le volume d'air théoriquement nécessaire pour brûler un combustible dont la composition est exactement connue par l'analyse.

Pour brûler une houille de composition moyenne, il faut un poids d'air théorique de 11 kilogrammes environ présentant, à zéro et 760, un volume de 8,47 m³ environ. La quantité d'air employée en pratique peut se rapprocher beaucoup de cette quantité théorique, mais elle la dépasse parfois très notablement, ou lui est inférieure; la combustion est alors incomplète, ou peu économique, suivant la manière dont la chauffe est conduite, selon le système de foyer et les conditions du fonctionnement.

Les meilleures conditions consistent à assurer une combustion complète, quitte à envoyer un faible excès d'air. Un excès d'air trop considérable est nuisible d'une part parce qu'il cause un refroidissement du foyer peu favorable à la combustion et d'autre part parce qu'il entraîne au dehors, dans la cheminée, une quantité de chaleur perdue plus considérable. En outre, le tirage devra être plus actif puisque le volume total des gaz à débiter dans l'unité de temps est plus grand, il faudra marcher avec un échappement plus serré et les gaz, étant animés d'une vitesse plus élevée, se mélangeront moins intimement dans le foyer, la proportion de ces gaz non brûlés qui s'échappera dans la boîte à fumée sera plus grande.

La combustion peut être incomplète sans qu'il y ait production de fumée, l'oxyde de carbone étant incolore, mais la fumée est un indice certain de combustion incomplète. La fumée proprement dite n'est pas formée, comme on pourrait le croire au premier abord, de particules désagrégées du charbon solide entraînées par le courant, mais se trouve constituée par du carbone libre dû à la décomposition des hydrocarbures pendant leur passage à travers le combustible en ignition. Une partie seulement de ce carbone se trouve brûlée; le reste, précipité à l'état de noir de fumée, est entraîné par le courant gazeux. Le carbone pur, le charbon de bois, le coke pur, ne donnent pas de fumée, même si la combustion est incomplète, parce qu'ils ne contiennent pas d'hydrocarbures. Les charbons gras en donnent beaucoup pour la raison inverse.

Au moment du chargement du foyer, si la houille employée est tant soit peu grasse, il se dégage au sommet de la cheminée une fumée d'abord assez épaisse dont l'épaisseur et la teinte foncée s'affaiblissent de plus en plus et disparaissent à peu près complètement jusqu'au nouveau chargement. Plus la houille est grasse et le tirage faible et plus la fumée est noire et épaisse, plus elle persiste longtemps.

On ne doit pas s'exagérer l'importance de la perte due à la production de la fumée qui est beaucoup moins grande qu'on est porté à le croire. Les

expériences de MM. Schœurer-Kestner, Graham et beaucoup d'autres ont permis d'affirmer que cette perte dépasse rarement 1 0/0 et reste souvent bien au-dessous.

Ce n'est pas dans la combustion du carbone en suspension qu'il faut chercher l'économie, mais dans celle des éléments gazeux qui l'accompagnent et qui restent invisibles : l'hydrogène et l'oxyde de carbone.

L'hydrogène se trouve contenu dans les houilles à l'état d'hydrocarbures (dont les principaux sont les gaz C^2H^4 et C^4H^4) formant, suivant la nature de ces combustibles, de 20 à 30 0/0 du poids total. Ces hydrocarbures distillent, dès que la houille est fortement chauffée; si la température du foyer est trop peu élevée ou si l'air n'arrive pas abondamment au-dessus de la couche de combustible, ils ne se brûlent que très imparfaitement.

Pour assurer la combustion des hydrocarbures, il faut un volume d'air suffisant, mais pas en un grand excès qui entraînerait un abaissement de la température du foyer, suffisant parfois pour empêcher les hydrocarbures de s'enflammer. Il vaut mieux admettre la présence de la fumée qu'un trop grand excès d'air, cette fumée ne décelant qu'une perte minime, tandis que l'absence totale de fumée peut dissimuler une très grosse perte dont on ne possède aucun moyen de vérifier l'importance,

L'hydrogène, provenant de la décomposition des hydrocarbures, est d'ordinaire complètement brûlé, quand il n'y a pas entraînement de combustible vers la boîte à fumée, mais comme cet entraînement a presque toujours lieu, dans une proportion variable il est vrai, on peut considérer cette combustion comme très souvent incomplète parce qu'elle ne se continue pas à l'intérieur des tubes, même quand il y a excès d'air. Il peut en résulter une perte qui varie de 5 à 15 0/0. Le seul remède consiste à diminuer sinon à éviter l'entraînement du combustible incomplètement brûlé en proportionnant l'intensité du tirage à la nature du combustible. C'est là une question sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Le carbone n'est complètement brûlé, on le sait, que s'il est transformé en acide carbonique; tout dégagement d'oxyde de carbone non brûlé constitue une perte importante. En effet, la transformation du carbone en CO ne dégage que 2 400 calories, les 0,3 environ de la chaleur totale que donne sa combustion complète en CO^2 (8 083 calories), les 0,7 restant (5 683 calories) seraient fournis par la combustion de l'oxyde de carbone et sa transformation en acide carbonique. Pour que cette transformation ait lieu, il faut que le gaz vienne en contact avec une quantité d'air suffisante; d'après l'enseignement classique, le CO ne se transformerait en CO^2 qu'à la condition d'être porté à une température suffisamment élevée et l'on a basé sur cette hypothèse de nombreux appareils en vue d'améliorer la combustion.

Or, d'après les travaux récents d'un savant allemand R. Ernst[1], corroborés par des expériences qui paraissent assez concluantes, ce seraient précisément les conditions contraires qui interviendraient. La production de l'oxyde de carbone serait liée à la température et augmenterait ou diminuerait avec son intensité. A une température supérieure à 1 000° environ, la combustion, même en présence d'un excès d'oxygène, donnerait de l'oxyde de carbone qui ne se combinerait avec l'oxygène de l'air pour fournir de l'acide carbonique que s'il est refroidi à une température inférieure à 1 000°, mais néanmoins assez élevée pour que la combinaison puisse se produire. Contrairement à ce qu'on a toujours cru, la production de CO^2 n'aurait lieu que dans la combustion peu active, à température relativement basse. D'après les expériences relatées, les produits de la combustion du charbon de bois brûlant lentement à l'air libre se composeraient de 13 0/0 de CO^2 et de 8 0/0 d'oxygène; dès que l'activité de la combustion devient très grande par suite de l'insufflation d'oxygène, la proportion de CO^2 tomberait à 2 0/0, la quantité d'oxygène augmentant proportionnellement dans les produits de la combustion.

D'autre part, en laissant peu à peu descendre la température d'un foyer soufflé alimenté au coke, on a constaté que la quantité de CO diminuait, rapidement dans les produits de la combustion, conformément aux chiffres suivants[2]:

Proportion, dans les produits de la combustion, de :	Début (Haute température.)				Fin (Basse température.)		
CO^2	4,4	7,2	11,0	14,8	16,5	18,9	19,8
CO	23,8	20,6	15,8	7,1	1,7	1,0	0,0

L'influence de la pression serait contraire à celle de la température, le degré d'oxydation augmentant avec la pression du milieu. Le carbone se conduirait donc à peu près comme le soufre dont la combustion à l'air libre donne du gaz SO^2 tandis que, sous une pression de 41 atmosphères, elle donne 65 0/0 de SO^3 et seulement 35 0/0 de SO^2.

D'après M. R. Ernst, le CO ne proviendrait pas de la dissociation ou de la réduction du CO^2, mais se formerait directement, comme premier produit de la combustion, aux températures supérieures à 1 000°.

Si cette théorie se trouve vraie, on aurait tout intérêt, au point de vue du rendement du combustible, à ne pas trop pousser l'activité des foyers et à les disposer de manière qu'ils puissent transmettre très rapidement la chaleur à l'eau de la chaudière, pour éviter l'élévation trop grande de la température à leur intérieur, favorable à la production de CO. C'est peut-être une des

[1] *Les Principes de la combustion*, par M. R. Ernst, mémoire lu à l'Université de Giessen, Hambourg, en 1892.

[2] *The Railway Review*, numéro du 8 août 1896; *American Engineer*, numéro d'octobre 1896.

causes, encore mal définies, qui rendent peu économiques les combustions très intenses.

Jusqu'ici, on a admis que l'oxyde de carbone qui se trouve dans le foyer provient de la décomposition du CO^2 formé à la base du feu, contre la grille, au point où l'air arrive en excès, lors de son passage à travers le combustible. Si ce gaz n'entraîne pas avec lui une colonne d'air suffisante pour assurer la combution au sein de la masse incandescente, cette combustion s'effectuera aux dépens de son oxygène lui-même. La moitié de cet oxygène s'unit au même poids de carbone pour former un volume de CO double du volume de CO^2 qui lui a donné naissance : $CO^2 + C = 2CO$. La chaleur de décomposition étant égale à la chaleur de composition, on recueille finalement le même nombre de calories, si on assure la combustion complète de l'oxyde de carbone, que si le carbone avait été tout d'abord brûlé complètement pour former de l'acide carbonique.

Si l'on désigne par v et v' les volumes relatifs de CO^2 et de CO produits par la combustion le rapport $\frac{v'}{v+v'}$ représente celui de la quantité de chaleur non développée par le carbone restant dans l'oxyde de carbone, au lieu de passer à l'état d'acide carbonique, à la quantité de chaleur totale qui correspondrait à la combustion parfaite en CO^2.

En résumé, les causes entraînant les pertes auxquelles sont soumis les foyers se rattachent :

1° A l'entraînement d'une fraction du combustible, seulement partiellement brûlé, vers la boîte à fumée ;

2° A la chute d'une autre fraction du combustible, aussi incomplètement brûlé, dans le cendrier, à travers la grille ;

3° A la combustion incomplète de l'oxyde de carbone, soit formé directement, soit produit par dissociation ;

4° A la combustion incomplète des hydrocarbures.

70. De la combustion dans les foyers de locomotives. — Dans la locomotive, le foyer est intérieur et de forme rectangulaire ; les produits de la combustion s'en échappent à travers un faisceau tubulaire disposé horizontalement et aboutissant à l'intérieur de la boîte à fumée située à l'autre bout. La grille est en contre-bas de la rangée inférieure des tubes, d'une quantité variable suivant que le foyer est plus ou moins profond ; elle est horizontale ou faiblement inclinée vers l'avant. Le chargement s'opère par une porte pratiquée dans la paroi arrière, vis-à-vis du faisceau tubulaire et à une hauteur parfois assez grande au-dessus de la grille.

L'appel de l'air résultant de la dépression créée à l'intérieur de la boîte à fumée par le jet d'échappement, on est maître, en réglant d'une manière

permanente ou variable, la section de la tuyère d'échappement, de lui donner la valeur nécessaire pour obtenir tous les degrés de combustion admissibles dans la pratique. Nous verrons que le jet d'échappement agit d'une manière pour ainsi dire automatique ; sa vitesse étant proportionnée à la puissance développée, l'intensité du tirage varie à peu près dans le rapport voulu pour mettre la production au niveau de la dépense.

Le degré d'intensité de la combustion qu'il est nécessaire d'atteindre dans les foyers de locomotives, dont la surface de grille est fort réduite par rapport à la puissance maximum qu'elles doivent développer, oblige ordinairement à marcher avec une couche de combustible plus épaisse sur la grille qu'il n'est d'usage dans les foyers des autres chaudières. Ce peut être une cause de perte par combustion incomplète si on ne prend pas les précautions voulues.

Le mode de chargement des foyers de locomotives est d'ailleurs variable suivant la nature du combustible et le type du foyer [1] ; il peut se rattacher à trois méthodes distinctes :

Chargement en couche épaisse ;

Chargement par côtés ;

Chargement en couche mince.

La méthode de chargement en couche épaisse, suivie pour les foyers profonds dans lesquels on brûle de bons combustibles demi-gras en gros fragments, est à peu près générale en Angleterre. C'est celle qui permet de brûler la plus grande quantité de charbon par unité de temps sur une grille de surface donnée, à condition bien entendu que le tirage soit suffisant. On peut dire que cette méthode est jusqu'à un certain point le résultat de l'emploi de houilles en gros fragments qui laissent entre eux des vides souvent considérables et à travers lesquels l'air passerait trop librement si on ne superposait pas un grand nombre de morceaux, mais elle est fort avantageuse quand la nature du combustible s'y prête en permettant l'emploi de foyers relativement petits. Quand le foyer est complété par une voûte en briques avec rentrée d'air, c'est peut-être le mode de chauffe le plus économique, le foyer se transformant en véritable gazogène ; c'est en tous cas celui qui permet le mieux aux machines de faire face à une brusque augmentation de la puissance à développer. La briquette de bonne qualité, concassée en gros morceaux, peut aussi se brûler suivant la même méthode.

Le charbon est chargé sur la grille en une masse inclinée, plus épaisse à l'arrière où elle s'élève jusqu'au bord du cadre de la porte, tandis qu'à l'avant son épaisseur n'est que de 0,15 m. à 0,20 m. Parfois aussi l'épaisseur de la couche est réduite au milieu et plus faible en ce point que vers l'avant. Le combustible est chargé à l'arrière et descend peu à peu vers l'avant à mesure

[1] Voir *La chaudière locomotive*, par G. Richard, chap. VI.

que sa combustion s'achève. A l'avant, il est entièrement incandescent tandis qu'à l'arrière, près de la porte, il est presque noir. L'air ne pouvant traverser en ce point la masse trop épaisse du combustible, celui-ci, chauffé surtout par rayonnement, distille tout d'abord ses hydrocarbures. La combustion du carbone contenu dans le combustible ne s'opère qu'au milieu ou à l'avant, sur les points où, la couche étant plus mince, l'air arrive avec assez d'abondance. Dans la partie moyenne, l'acide carbonique, résultat de la combustion des couches inférieures du combustible, se décompose en partie en oxyde de carbone et oxygène au contact des couches superficielles de charbon en ignition. Il est nécessaire, avec ce mode de chauffe, de permettre à l'intérieur du foyer la rentrée d'une forte quantité d'air au-dessus du combustible pour brûler l'oxyde de carbone et les hydrocarbures. A cet effet, la porte du foyer est percée d'ouvertures de large section. On va même plus loin en Angleterre où la porte du foyer reste normalement ouverte ; tout au plus certaines machines sont-elles munies, devant l'orifice du foyer, d'un écran évitant que le rayonnement du feu ne vienne éblouir le mécanicien et l'empêcher, la nuit, de voir les signaux. L'air s'introduit par la porte et brûle les gaz qui remplissent la boîte à feu. Avec les autres systèmes de foyers et modes de chauffe, l'ouverture continuelle de la porte, au lieu d'être nécessaire et avantageuse comme dans le cas que nous considérons, aurait pour effet, en introduisant un excès d'air inutile, d'amener un refroidissement et de diminuer l'intensité du tirage.

Le foyer Ten Brinck réalise, d'une manière un peu différente, le même objet que le foyer anglais à rentrée d'air, muni d'une voûte en briques.

On ne saurait brûler économiquement le charbon en couche *uniformément* épaisse. En effet, si l'épaisseur du combustible était en tous points aussi forte que dans le voisinage de la porte, la température du foyer se trouverait relativement très basse et les gaz ne se rallumeraient pas au contact de l'air introduit par la porte. Ces gaz en outre seraient plus abondants parce que le carbone ne venant à brûler que quand il parvient, peu à peu, vers le fond, presque immédiatement sur la grille, où l'air est en abondance, l'acide carbonique, produit de sa combustion, viendrait à se dissocier en traversant les couches supérieures de combustible et il y aurait formation d'une quantité considérable d'oxyde de carbone. On aurait à vrai dire un gazogène plus parfait mais dont les gaz s'échapperaient au dehors sans être brûlés. Le foyer profond avec chargement en couche épaisse constitue au contraire un appareil formant tout à la fois gazogène et appareil de combustion.

Finalement, le chargement en couches épaisses est préférable à tous les autres quand la qualité du charbon se prête à son usage, parce qu'il est économique, permet de développer, à surface de grille égale, une quantité de chaleur beaucoup plus grande que tous les autres modes de chauffe et qu'il est le

plus facile à conduire. C'est grâce à ce système de chargement que les locomotives employées en Angleterre sont capables malgré leurs grilles réduites (1,60 m² à 1,80 m²) d'accomplir des services demandant une grande production de vapeur. On peut en dire autant des locomotives de la Compagnie d'*Orléans* dont les grilles ne sont pas plus grandes et qui suffisent à produire une vaporisation de 6 à 7000 l. par heure au moins.

Le chargement en couche épaisse ne convient pas aux houilles friables susceptibles de s'agglomérer et de produire des mâchefers encrassant la grille.

Nous avons la conviction que l'on pourrait utiliser, pour des services auxquels elles ne paraissent plus propres, bien des anciennes machines à petit foyer profond, en y brûlant de la briquette concassée en gros morceaux suivant le mode de chargement indiqué ci-dessus, après avoir muni leurs foyers de voûtes en briques.

A la Compagnie du *Nord*, dans les machines express ayant un foyer suffisamment profond, comme les compound à quatre cylindres par exemple, on monte d'abord le feu avec des briquettes en couche très épaisse à l'arrière, presqu'à fleur de la porte. On alimente ensuite presque exclusivement avec de la houille en laissant tomber un peu l'épaisseur du feu.

Dans la *méthode dite par côtés*, la plus employée en France, très usitée aussi en Angleterre et dans d'autres contrées, on charge contre les parois et vers l'arrière, le combustible qui descend peu à peu vers le centre de la grille sous l'action des trépidations et du tirage. Au centre de la grille, la couche de combustible est plus mince et l'air la traverse aisément, il y a un excès d'air et la combustion est très active ; la distillation se fait sur les côtés et les gaz sont brûlés par l'air arrivant à travers la grille dans la partie centrale, et réchauffé par son passage à travers le combustible en ignition. On peut aussi, surtout si l'on donne à la couche de combustible une épaisseur un peu grande, effectuer une rentrée d'air par la porte mais moins abondante que dans le cas précédent. Ce mode de chargement donne d'excellents résultats avec la plupart des combustibles employés chez nous, mais il demande beaucoup de soin et d'attention de la part du chauffeur qui doit effectuer le chargement avec précision et rapidité, boucher les trous au fur et à mesure qu'ils se produisent et déposer alternativement le combustible dans les coins et contre la face arrière du foyer ; cette chauffe constitue une opération beaucoup moins machinale que la précédente.

Le chargement par côtés, intermédiaire entre le précédent et la méthode par couche mince, et qui convient également à des qualités intermédiaires de combustible, ne permet pas une production aussi abondante que le chargement en couche épaisse ; mais il est économique et a l'avantage de bien ménager les parois du foyer, protégées par le combustible relativement froid

qui les touche. Il s'applique aux foyers profonds et de profondeur moyenne et à des qualités très variables de combustibles, avec des grilles horizontales ou inclinées. La voûte en briques n'est pas, avec cette méthode, indispensable comme pour la chauffe en couche épaisse, mais elle est utile et améliore notablement la combustion. A vaporisation égale, le chargement par côtés demande une surface de grille plus grande d'environ un tiers que le chargement en couche épaisse.

La *méthode par couche mince* s'emploie avec les houilles maigres et les menus ne s'agglomérant pas au feu ou avec l'anthracite en noisettes ou menue. L'épaisseur de la couche de combustible étant très mince, la surface de la grille doit être très grande afin que le foyer contienne à tout instant une quantité suffisamment grande de combustible en ignition. Cette surface s'élève à près de 6 m² dans les foyers Belpaire de certaines machines de l'*Etat belge* et jusqu'à 8 m² dans les foyers Wootten à anthracite usités dans quelques parties des Etats-Unis. Pour ne pas donner à la grille une longueur excessive, on l'élargit alors en la faisant déborder latéralement au-dessus des roues. Les grilles doivent, avec ce système, être horizontales et composées de barreaux minces et rapprochés. Les charges sont très fréquentes; afin d'assurer l'uniformité de la couche du combustible et d'éviter la formation des trous, on y distribue le charbon sur toute la surface en le lançant à la volée. Le tirage doit être très doux afin de ne pas produire l'entraînement d'un combustible léger sur la grille; il l'est naturellement par suite de la grande surface de la grille sur laquelle se répartit l'appel de l'air. Cela ne suffit pas toujours et l'on doit parfois marcher avec des échappements très peu serrés. Aux Etats-Unis, ces foyers ont surtout été appliqués à des locomotives compound dont l'échappement est moins violent que celui des machines à simple expansion.

Ce mode de chauffe s'applique seulement à des foyers extrêmement plats et sans voûte en briques, munis autant que possible de deux portes de chargement. Ces portes doivent être placées au niveau de la grille pour faciliter le travail du chauffeur.

La combustion qui résulte de cette méthode de chauffe ne doit pas être très économique, si la nouvelle théorie de la combustion préconisée par M. Ernst et dont nous avons parlé plus haut, se trouve vérifiée dans la pratique courante. L'oxyde de carbone, formé directement à haute température par la combustion du carbone, ne se trouve pas mélangé à une quantité d'air assez grande pour brûler intégralement; il passe bien un excès d'air à travers des grilles aussi vastes, mais comme les foyers sont très peu profonds, et que le parcours des gaz est direct, il n'y a pas de mélange intime entre ceux-ci et l'air comburant. C'est pourquoi il est utile d'ajouter, comme on le fait le plus souvent, une chambre de combustion à l'avant.

Le volume d'air ordinairement fourni dans les foyers de locomotives pour la combustion du charbon est rarement en grand excès, il est parfois même inférieur à la quantité théoriquement nécessaire, d'où résulte une combustion souvent imparfaite. C'est pour remédier à cet inconvénient que beaucoup de foyers sont disposés pour recevoir directement une rentrée d'air. Un excès d'air de 25 à 30 0/0 suffit en général pour assurer une combustion complète, mais il fait perdre, on ne doit pas l'oublier, par la quantité de chaleur rejetée en pure perte dans l'atmosphère, une partie des avantages inhérents à une combustion complète. Il semble, d'après les expériences faites à ce jour, que la combustion la plus économique corresponde à un volume d'air de 10, 5 m³ par kilogramme de *carbone*, soit un excès d'environ 1/5.

Nous donnerons comme exemple les résultats fournis par les expériences des compagnies de *Lyon* et de l'*Est*.

Dans les expériences de *P.-L.-M.*, le volume d'air employé était extrêmement voisin du chiffre théorique (8,49 m³), soit :

	Foyer ordinaire.	Voûte longue.	Voûte courte.	Ten Brinck.
Moyennes.	8.9 m³ à 10,1 m³	8,8 m³ à 9,5 m³	9,0 m³ à 9,5 m³	8,9 m³ à 9,6 m³

D'après les essais effectués en 1890 par M. Dubost sur des locomotives de la Compagnie de l'*Est*[1], le volume d'air a été souvent notablement supérieur à celui qui est théoriquement nécessaire, dans la supposition où la combustion de l'hydrogène était complète, les chiffres les plus bas étant atteints dans les foyers peu profonds. La proportion d'air en excès a été de :

34 0/0 pour une machine sans voûte ni prise d'air ;
32 — pour une machine avec voûte et déflecteur ;
37 — pour une machine sans déflecteur ni prise d'air ;
54 — pour une machine ayant un déflecteur mais pas de voûte.

La proportion d'air s'est au contraire trouvée presque toujours insuffisante, parfois dans une proportion de 35 0/0, en tenant compte de l'hydrogène non brûlé.

Le volume d'air n'est pas descendu au-dessous de 8,8 m³ et a atteint le maximum constaté dans les expériences (11,5 m³), dans les foyers les plus petits et les plus profonds.

Dans les expériences de la Compagnie de *Lyon*, l'imperfection de la combustion exprimée par le rapport $100 \frac{CO}{CO + CO^2}$ a varié comme l'indique le tableau ci-après, qui fait ressortir les avantages que présentent à ce point de vue la voûte en briques et le bouilleur Ten Brinck :

[1] *Expériences sur la combustion dans les foyers de locomotives*, par M. F. Dubost, *Revue Générale des Chemins de fer*, numéro de février 1891.

TIRAGES EN MILLIMÈTRES		CHIFFRES ABSOLUS											
		FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			TEN BRINCK		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
Degré d'imperfection de la combustion. $100 \frac{CO}{CO + CO^2}$	7	10,3	11,0	13,3	6,4	8,7	7,4	»	»	»	10,0	6,4	11,1
	6	7,7	10,2	14,4	7,8	4,1	11,7	9,6	8,3	6,3	9,2	9,5	11,1
	5	10,4	10,9	»	4,1	6,5	4,9	5,8	»	4,6	6,2	6,5	2,9
	4,50	7,4	15,4	16,4	8,5	10,4	10,3	4,4	9,2	12,4	8,7	3,2	8,2
	4	12,5	14,2	15,9	6,5	»	5,9	8,6	8,6	7,6	6,2	6,5	5,0
	3,50	13,0	7,1	13,2	10,5	6,8	10,5	9,5	8,0	9,7	9,0	11,5	7,4
	3	8,5	11,0	15,5	5,7	12,6	9,0	9,1	5,8	11,0	6,8	4,6	9,0
Moyennes.	»	9,9	11,4	14,4	7,0	8,1	8,5	7,8	7,9	8,6	8,3	6,9	7,8

Les expériences de M. Dubost ont donné, pour le rendement de combustible dans les foyers de locomotives, des moyennes comprises entre 0,665 et 0,815 dans la supposition où la combustion de l'hydrogène était complète et de 0,526 à 0,722 en tenant compte de l'hydrogène non brûlé. Les moyennes le plus souvent atteintes étaient respectivement dans les deux cas de 0,78 et de 0,68. Le rendement maximum théorique calculé était de 0,86 ; on peut donc dire que, en général, la combustion s'effectue bien dans ces foyers de locomotives.

Nous compléterons ces renseignements par quelques résultats d'analyse effectués dans les locomotives sur les produits de la combustion :

NATURE DES PRODUITS DE LA COMBUSTION
(*en volumes.*)

	ACIDE CARBONIQUE 0/0	OXYGÈNE 0/0	OXYDE DE CARBONE 0/0	RÉSIDU 0/0
Expériences de l'Est	15,29	3,73	0,78	80,20
	12,69	6,31	0,82	80,18
	13,55	6,10	0,05	80,30
— de M. Kennedy . . .	12,40	6,20	1,10	80,30
	11,20	7,8		81,00
— du L. and Y. Ry . . .	12,85	4,15	0,80	82,80
	15,10	1,97	0,85	82,08
— de M. Goss	5,25	12,15	0	82,60
	6,25	11,30	0	81,95
	4,80	14,60	0	80,60
	1,80	18,70	0,55	78,95

71. Dispositions propres à améliorer la combustion dans les foyers de locomotives. — Le foyer de la locomotive tel que nous l'avons supposé jusqu'ici, sans l'addition d'aucun organe ni appareil accessoire, permet une combustion assez économique quand on emploie, en couche assez mince, des houilles de qualité moyenne, pas trop grasses, et que l'allure du feu n'est pas très forcée. Quand les conditions contraires se trouvent réalisées, c'est-à-dire s'il est nécessaire de brûler avec une grande activité et en couche assez épaisse des combustibles renfermant une grande proportion de matières volatiles, on risque de n'obtenir qu'une combustion assez incomplète, l'air n'arrivant pas à travers la grille en quantité suffisante et ne se trouvant pas bien brassé avec les produits de la combustion qui s'échappent par le faisceau tubulaire, où ils s'éteignent avant que leur combustion soit complète.

En outre quand, dans le foyer ordinaire, on ouvre la porte pour effectuer le chargement, il s'opère d'importantes rentrées d'air à l'intérieur de la boîte à feu qui, n'étant pas complétées par les dispositifs nécessaires, n'ont guère pour effet que d'entraîner des refroidissements brusques nuisibles à la production de la vapeur et à la conservation de la plaque tubulaire contre laquelle cet air est projeté avant de s'être suffisamment échauffé.

On a recherché à remédier à ces divers inconvénients par différents procédés :

(*a*) En opérant une rentrée d'air méthodique et réglée au-dessus du combustible ;

(*b*) En effectuant un brassage énergique des gaz et de l'air comburant;

(*c*) En protégeant la plaque tubulaire contre ces rentrées d'air;

(*d*) En augmentant la température du foyer.

De la combinaison de ces divers procédés il est résulté l'adoption de quelques types de foyers actuellement très répandus qui peuvent se rattacher à deux classes principales. Dans la première, classique en Angleterre et très usitée maintenant sur le continent, on place dans le foyer une voûte en briques réfractaires qui ramène les produits de la combustion vers la porte munie d'un déflecteur en tôle destiné à projeter l'air sur le courant gazeux, de manière à le briser et à former un mélange qui facilite la combustion. Dans la seconde, dont le type est le foyer Ten Brinck, la voûte est remplacée par un bouilleur et la projection d'air à l'intérieur du foyer se fait par une ouverture allongée, prenant la plus grande partie de la largeur de la boîte à feu et placée au-dessus de la porte de chargement proprement dite.

Enfin quelques inventeurs ont appliqué, à titre d'essai, des foyers entièrement en matériaux réfractaires qui ne sont pas encore usités dans la pratique courante mais se répandront peut-être dans l'avenir.

72. Rentrées d'air à l'intérieur du foyer. — Une partie de l'air nécessaire à la combustion étant destinée à se combiner avec le carbone du combus-

tible, une autre avec le carbone du CO, une autre avec l'hydrogène des hydrocarbures; il semble logique d'admettre directement dans le foyer, au-dessus de la grille, l'air nécessaire à la combustion des gaz.

Si le chargement du foyer était opéré d'une manière continue et uniforme, l'introduction de l'air par la porte pourrait l'être aussi. Tel n'est pas le cas en pratique. Aussitôt après une charge, il se produit une forte émission de gaz, laquelle diminue au fur et à mesure que le charbon se transforme en coke. Au début, il faudrait introduire dans le foyer le maximum d'air, soit un tiers du volume total, tandis qu'à la fin la seule quantité nécessaire est celle qui est indispensable à la combustion de l'oxyde de carbone provenant de la réduction pendant le passage de l'acide carbonique à travers le combustible incandescent. Or, on ne peut réaliser ces conditions pratiquement. Il est difficile de construire des appareils automatiques ou de se fier à la main du chauffeur. Il vaut mieux envoyer au-dessus de la grille une quantité d'air moyenne, choisie de telle sorte qu'il n'y en ait pas un trop grand excès quand la distillation du combustible touche à sa fin. Immédiatement après une charge, la température du foyer s'abaisse, tant à cause du rayonnement qui se trouve momentanément intercepté qu'en raison de l'absorption de chaleur due au changement moléculaire qui s'opère au sein du combustible. Si l'on n'introduit pas à ce moment de l'air dans le foyer, on perd la chaleur virtuelle que possèdent les gaz, laquelle ne peut être récupérée que par la combustion des hydrocarbures et de l'oxyde de carbone qui peuvent s'y trouver mélangés.

L'oxyde de carbone étant incolore, on ne peut se rendre compte de l'imperfection de la combustion que si ce gaz sort assez chaud pour se rallumer au sommet de la cheminée en venant en contact avec l'air, ce qui n'est jamais le cas dans les locomotives. On distingue ce gaz des hydrocarbures par la couleur de sa flamme qui est bleue, celle des hydrogènes carbonés étant jaunâtre.

Les rentrées d'air opérées à l'intérieur du foyer ont pour but de brûler les hydrocarbures et l'oxyde de carbone; elles doivent être complétées, pour avoir toute leur efficacité, par des dispositions particulières, telles que l'*auvent*, le bouilleur Ten Brinck ou la *voûte en briques*, ainsi que nous le verrons plus loin. Ces rentrées d'air peuvent s'effectuer de plusieurs manières : par les côtés, par la face avant du foyer ou par la porte. Ce dernier système est le seul qui soit très répandu, mais il est nécessaire de dire un mot de quelques-uns des autres dispositifs.

On peut produire la rentrée de l'air sur les côtés au moyen de petits tubes de 50 à 70 mm. de diamètre, montés entre les entretoises, sur les quatre faces de la boîte à feu, mandrinés dans la tôle d'enveloppe et dans la paroi du foyer, situés à une hauteur de 0,15 m. à 0,25 m. au-dessus du niveau

supérieur du combustible. Cette disposition est rarement usitée ; elle est simple et assez rationnelle, mais elle ne se prête à aucun réglage, les ouvertures des tubes ne pouvant être munies de registres sur les quatre faces du foyer. Elle est employée sur quelques machines du *Great North of Scotland.*

Nous passerons sous silence quelques dispositions exceptionnelles, telles que celles de Népilly, de Reimher, etc., pour lesquelles nous renvoyons à la *Chaudière locomotive* de M. G. Richard.

La Compagnie de l'*Est* a mis en service il y a quelques années, à titre d'essai, trois dispositions décrites ci-dessous :

Dans la première disposition, l'arrivée d'air s'effectue à l'aide de trous ménagés entre les entretoises, traversant la plaque tubulaire et la plaque avant de l'enveloppe. Ces trous débouchent un peu au-dessous de la voûte en briques; ils peuvent mettre le foyer en communication avec l'air extérieur ou se trouver obturés complètement à l'aide d'un vaste clapet à charnières que le mécanicien manœuvre de sa place par l'intermédiaire d'un renvoi, de manière à régler ou supprimer l'accès de l'air.

La deuxième disposition consiste en une grille presque verticale placée à l'avant du foyer et formée par trois plaques de fonte juxtaposées à côté l'une de l'autre et percées de lumières.

La grille s'appuie par sa partie supérieure contre la plaque tubulaire un peu en dessous de la voûte en briques; à sa partie inférieure, elle repose sur un sommier qui sert à supporter en même temps les barreaux de la grille ordinaire, raccourcis de manière à laisser un vide de 105 mm. de largeur entre le cadre du foyer et l'extrémité inférieure de la grille.

Avec ce dispositif une partie de l'air arrivant dans le cendrier a accès directement entre la grille presque verticale et la plaque tubulaire pour passer de là dans le foyer. Il existe ainsi à l'avant du foyer et sous la voûte en briques une arrivée d'air frais qui sert à brasser les gaz et à achever la combustion du charbon placé sur la grille, lequel peut n'être qu'insuffisamment brûlé par l'air qui a traversé la grille ordinaire.

La troisième disposition, qui remplit le même office que la précédente et qui a été appliquée sur quelques machines, consiste à amener l'air en dessous de la voûte au moyen de canaux en fonte partant du dessous du cadre et passant entre l'extrémité de la grille ordinaire, raccourcie, et la plaque tubulaire.

Un revêtement en briques réfractaires sert à protéger ces canaux et un clapet manœuvré par une commande permet de régler l'accès de l'air suivant les besoins de la combustion.

Dans le foyer à parois en briques réfractaires (système Docteur) appliqué à une locomotive de l'*Etat belge*, on effectue une rentrée d'air importante

au-dessus du feu à l'aide d'ouvertures rectangulaires, ménagées sur les côtés à peu de distance au-dessus de la grille, déversant de l'air porté à une haute température à l'intérieur de carneaux ou de conduits placés à l'intérieur des briques formant l'enveloppe de la boîte à feu. Le réchauffage de l'air présente un grand avantage quand on peut le produire parce qu'il permet une combustion plus économique et ménage davantage les parois du foyer qui ne sont plus soumises à l'action de contractions nuisibles à leur conservation.

Depuis longtemps, dans la disposition classique en Angleterre, l'air est introduit à l'intérieur du foyer par des ouvertures ménagées à l'intérieur de la porte de chargement ou par l'ouverture de cette porte elle-même que l'on

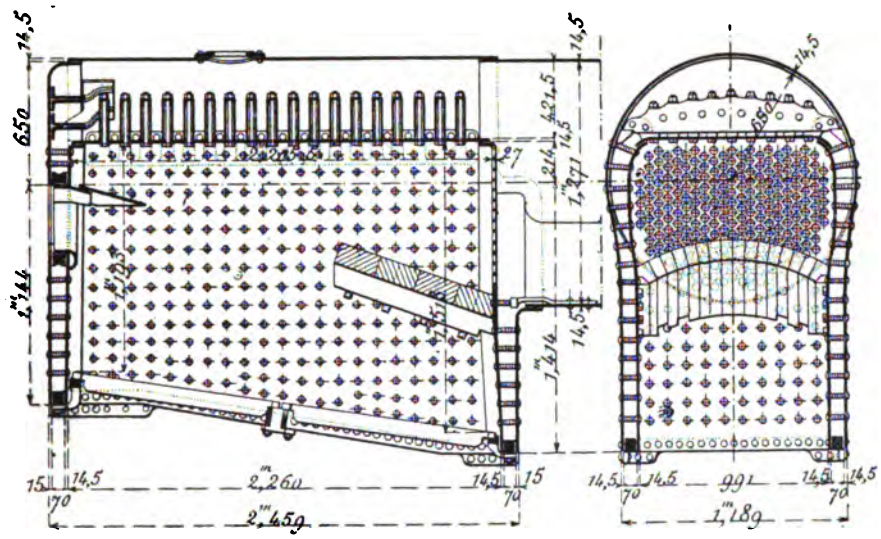


Fig. 251. — Foyer muni d'une voûte en briques et d'un auvent (*Est*).

ne ferme pas. Un *auvent* en tôle ou *déflecteur*, fixé au cadre de la porte (fig. 251), dirige l'air obliquement vers le feu et l'empêche de s'échapper directement vers les tubes. Cette disposition a l'avantage de déterminer un brassage assez énergique des gaz et de l'air, les deux courants se rencontrant sous un angle de 100° environ. L'auvent évite aussi l'oxydation rapide des parois du foyer qui accompagne l'emploi des entretoises perforées, dans le voisinage de ces dernières; mais il se détruit très rapidement, ce qui n'a que peu d'inconvénients d'ailleurs car on le remplace à peu de frais. Nous décrirons plus loin les principaux types de portes employés sur les locomotives; il nous suffira pour le moment de rappeler que certaines Compagnies emploient, au lieu de l'auvent, des portes à charnière horizontale, s'ouvrant vers l'intérieur du foyer et formant elles-mêmes déflecteur. Ce système, originaire d'Angleterre, est usité sur un certain nombre de locomotives de la Compagnie de l'*Ouest* et a été essayé par la Compagnie de l'*Est*.

Outre l'économie qu'elles procurent, un avantage indiscutable des rentrées d'air à l'intérieur du foyer consiste dans ce fait qu'elles réduisent le volume d'air qui doit traverser le combustible et permettent de marcher avec un tirage et une intensité de combustion plus considérables sans déterminer au même degré les entraînements de combustible vers la boîte à fumée.

73. Voûte en briques. — La voûte en briques (comme le bouilleur *Ten Brinck*) est le complément indispensable des rentrées d'air à l'intérieur du foyer. Elle a pour but d'empêcher l'entraînement, dans le faisceau tubulaire, d'une partie des gaz du foyer avant leur combustion complète, de brasser et de mélanger ces gaz avec l'air en les ramenant vers l'arrière du foyer pour leur combustion, de réfléchir sur eux la chaleur rayonnante du combustible en ignition et de les échauffer aussi à son contact en raison de la haute température qu'elle possède. En maintenant la température du foyer à un degré suffisant pour permettre la combustion complète, avec le minimum d'air, de l'oxyde de carbone et des hydrocarbures, elle permet, combinée avec le déflecteur, de marcher économiquement en couche épaisse avec des charbons demi-gras et de développer une grande puissance, avec de faibles surfaces de grille, dans des foyers profonds.

Elle réduit l'entraînement des escarbilles dans une proportion que l'on estime au moins à 45 0/0. Avec l'écran en briques réfractaires employé sur quelques locomotives des chemins de fer de l'*Est* on a constaté une diminution bien plus considérable. Pour les machines à voyageurs de la série 2000, l'écran a réduit la quantité d'escarbilles entraînées de 1 142 l. pour 1 000 km. de parcours à 320 l.

En outre, la voûte protège les bouts de tubes et les plaques tubulaires en évitant les fuites qui s'y produisent fréquemment quand cette disposition n'est pas adoptée et quand la combustion est active.

La voûte en briques s'applique aux foyers profonds ou de profondeur moyenne, dans lesquels le chargement est effectué en couche épaisse ou par côtés.

Son principal inconvénient est son peu de durée (7 à 8 mois); mais si son entretien est pénible, il est en revanche peu coûteux.

La voûte, inclinée de l'arrière à l'avant, est située à quelque distance au-dessus de la grille et s'appuie sur la plaque tubulaire immédiatement au-dessous de la rangée inférieure des tubes; elle occupe environ la moitié de la longueur du foyer et repose contre deux sommiers vissés sur les parois latérales du foyer. On la construit ordinairement en briques crues de kaolin avec joints très minces d'un coulis de même nature (fig. 252 et 253).

Le foyer avec voûte en briques et déflecteur est depuis longtemps classique en Angleterre où l'on n'emploie que des foyers profonds brûlant en

couche épaisse des houilles assez bitumineuses. Il a été introduit en France depuis une dizaine d'années avec le plus grand succès. La voûte en briques

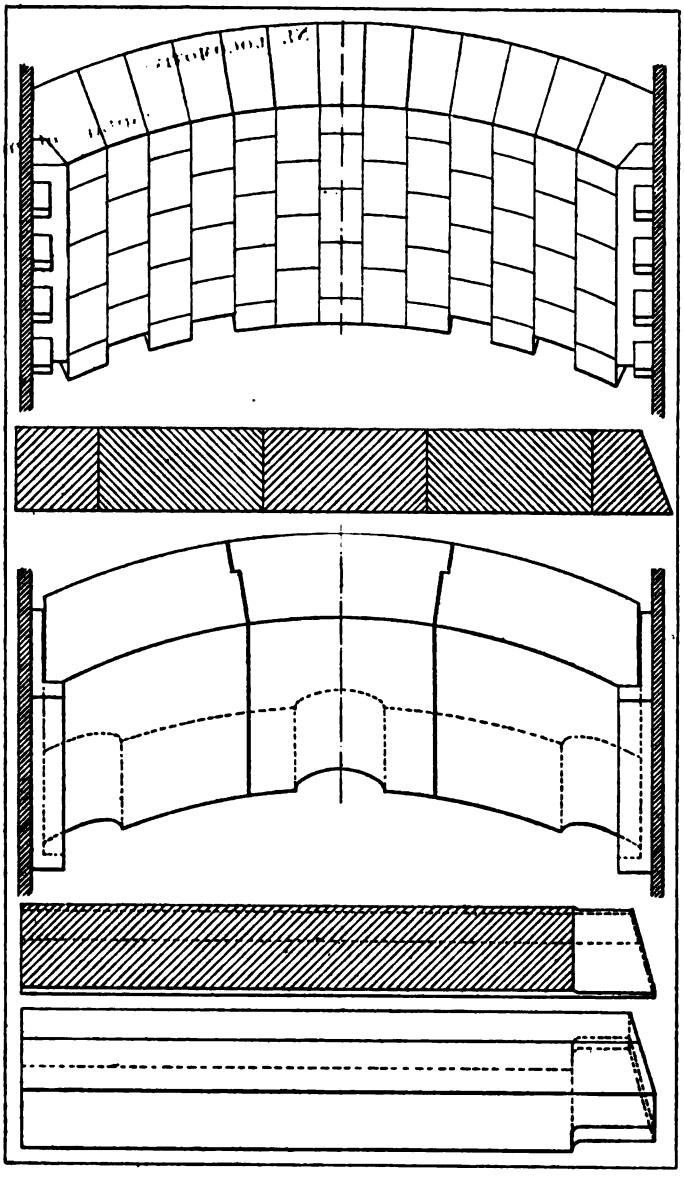


Fig. 252 et 253. — Types de voûtes en briques (d'après la Machine locomotive de M. E. Sauvage).

a été, croyons-nous, appliquée pour la première fois en France par la Compagnie de l'*Ouest* en 1884 ; elle est maintenant employée par la plupart de nos Compagnies sur une grande partie de leurs machines.

La voûte en briques améliore la combustion ; mais son effet est très

variable suivant le genre de foyer, la nature du combustible et l'activité de la combustion. A la suite de relevés effectués pendant une période de dix-huit mois, la *Compagnie de l'Est* a trouvé que son emploi donnait :

Une économie variable et finalement presque nulle pour les machines à grande vitesse (type 500) brûlant des menus;

Une économie de 2 0/0 avec les menus et de 1, 5 0/0 avec le coke pour les machines de banlieue (série 600) ;

Une économie de 7 0/0 pour les machines mixtes (série 400) brûlant des menus;

Une économie de 4 0/0 avec les menus et de 5,5 0/0 avec la grosse houille flambante pour les locomotives à trois essieux (série 0,250 à 0,499);

Une économie de 5 0/0 pour les machines à quatre essieux accouplés (0,501 à 0,700) brûlant des menus.

Finalement les avantages de la voûte en briques sont : d'améliorer la combustion dans une proportion d'autant plus grande que l'on brûle des houilles plus grasses, en plus gros fragments et en couche plus épaisse, ce qui explique son emploi général et déjà fort ancien sur les chemins de fer anglais; de faciliter la conduite du feu; de protéger la plaque tubulaire du foyer contre les coups de feu; enfin et surtout de réduire de plus de moitié l'entraînement des escarbilles, ce qui offre une grande importance pour le service des voyageurs, particulièrement sur les lignes de banlieue traversant des villes ou des faubourgs.

Par contre, la voûte rend plus difficiles et plus dispendieuses les réparations à exécuter aux tubes, aux entretoises et aux armatures de la plaque tubulaire ; il faut même parfois la démolir pour exécuter ces réparations. La présence de la voûte en briques augmente l'intensité du feu et rend plus rapide l'usure des flancs du foyer dans la partie comprise entre la voûte et la grille. Si la voûte est trop longue par rapport à la longueur intérieure du foyer, la flamme, venant frapper violemment la partie supérieure arrière du foyer, ronge les têtes des rivets du cadre de la porte, les têtes d'entretoises situées au-dessous de la porte et les écrous des boulons des fermes d'arrière; des fuites se produisent alors autour de ces têtes et écrous.

Ce fait a été nettement constaté à la *Compagnie de l'Est* dans les foyers de 1,800 m. de longueur des machines de banlieue n°s 613 à 704.

Les voûtes de 0,880 m. de longueur, appliquées tout d'abord à ces machines, ayant produit des usures et des fuites, leur longueur a été réduite à 0,660 m. et ces inconvénients ont disparu. Il a été ainsi bien établi que la longueur des voûtes doit être proportionnée à celle des foyers.

A la suite de divers essais, on a trouvé préférable de construire les voûtes au moyen de briques de petites dimensions.

Ces briques sont composées d'argile réfractaire très pure, convenablement lavée et dégraissée, et de ciment provenant de débris de briques réfractaires ou de produits analogues.

La voûte a l'inconvénient de masquer au mécanicien la plaque tubulaire dont il ne peut contrôler l'état, au point de vue soit de l'étanchéité, soit de la propreté. Pour remédier à ce défaut, la Compagnie de *Lyon* place au-dessus de la porte, dans ses locomotives de types récents, un petit regard fermé normalement par une porte, qui permet aux agents du service d'inspecter la plaque tubulaire et de se rendre compte en même temps de la manière dont s'opère la combustion.

Dans beaucoup de foyers profonds, ou tout au moins dans ceux qui ne

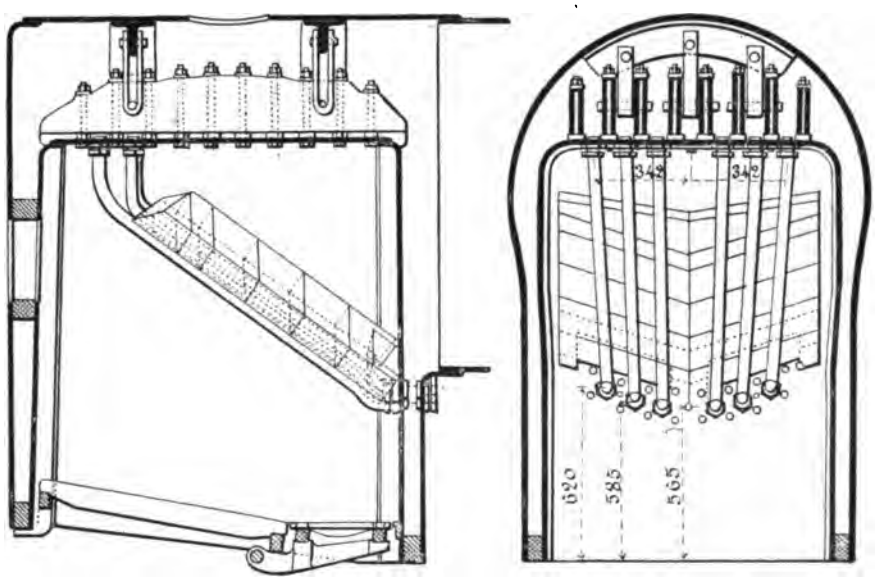


Fig. 254. — Écran en briques et tubes à eau (*État français*).

sont pas très plats, les Américains disposent des voûtes en briques analogues à celles qui sont en usage sur les chemins de fer européens. Toutefois la voûte en briques amène des avaries dans les foyers en acier en communiquant aux flancs du foyer, tout le long de son portage, une température tantôt plus basse, tantôt plus élevée que dans les autres parties, et notamment en empêchant en ce point son refroidissement aussi rapide que celui du reste du foyer lorsque le feu a été jeté. Aussi, la plupart des constructeurs s'attachent-ils à ne pas faire porter la voûte latéralement sur les côtés du foyer et la supportent simplement par des tubes qui, au nombre de trois ou quatre, réunissent la lame d'eau avant, au-dessous des tubes à fumée, au ciel du foyer ou à la lame d'eau arrière au-dessus de la porte. Ces tubes ont d'ailleurs l'avantage de créer une active circulation qui tend à empêcher

l'échauffement excessif des plaques tubulaires. Une disposition analogue a été appliquée par M. Ricour à des locomotives des Chemins de fer de l'*Etat français* (fig. 254).

La voûte en briques est quelquefois remplacée par un bouilleur communiquant avec les lames d'eau, comme dans le foyer Ten Brinck que nous décrivons plus loin. Ordinairement, ces bouilleurs font partie de la chaudière et se trouvent rivés sur les parois du foyer; il en résulte une raideur et un manque de liberté qui entraînent des dilatations et des contractions se traduisant rapidement par des fissures. M. Ten Brinck a obvié à cet inconvénient en rendant indépendant le bouilleur qui est relié aux lames d'eau par quatre tubulures, dont deux très longues, lesquelles donnent au système une élasticité suffisante pour annuler l'effet des dilatations. Ces tubulures demandent toutefois à être posées et ajustées avec beaucoup de soin sous peine de donner lieu à des fuites.

La Compagnie américaine du *New York Central* possède un assez grand nombre de machines, même de construction récente, dont le foyer présente une disposition que l'on trouvera plus loin. La boîte à feu est divisée, dans sa hauteur et sur toute sa section, par une lame d'eau inclinée de l'arrière à l'avant et percée en son milieu d'une ouverture permettant le passage des gaz et de la flamme. La partie située au-dessus du bouilleur forme une chambre de combustion. Cette lame d'eau n'est en somme que l'extension du système adopté aux États-Unis pour la plupart des foyers de locomotives renfermant quelques tubes à eau d'assez gros diamètre reliant la lame d'eau avant, sous le faisceau tubulaire, au ciel du foyer ou à la partie haute de la lame d'eau arrière et qui a pour but de supporter la voûte en briques et d'activer la circulation. Le bouilleur du *New York Central* protège très efficacement les plaques tubulaires contre l'action du feu, mais elle les masque complètement et rend les visites ou les réparations difficiles; les tôles qui le composent s'usent en outre très vite dans le voisinage de l'ouverture centrale dont la flamme vient constamment lécher les bords. En outre, les escarbilles, entraînées par le tirage, viennent s'accumuler sur ce bouilleur dans l'angle avant de la plaque tubulaire et peuvent, même après un temps de marche limité, venir boucher un certain nombre de tubes.

74. Foyer Ten Brinck. — Longtemps avant que l'usage de la voûte en briques et des déflecteurs s'introduise en France, la *Compagnie d'Orléans* employait d'une manière générale un type de foyer dit du système *Ten Brinck*, réalisant les mêmes desiderata par des moyens un peu différents.

L'application de ce foyer[1] a été faite, depuis l'année 1860, à plus de 1,200

[1] Voir la note très complète de MM. Durant et Lencauchez, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, juin 1890.

locomotives de la *Compagnie d'Orléans*, c'est-à-dire à la presque totalité du matériel. L'emploi de ce système a été fait primitivement dans le but de substituer à l'usage onéreux du coke celui de la houille sans produire de fumée dans les gares, même avec les combustibles fumeux que la Compagnie était tenue d'employer par sa situation géographique. Les excellents résultats

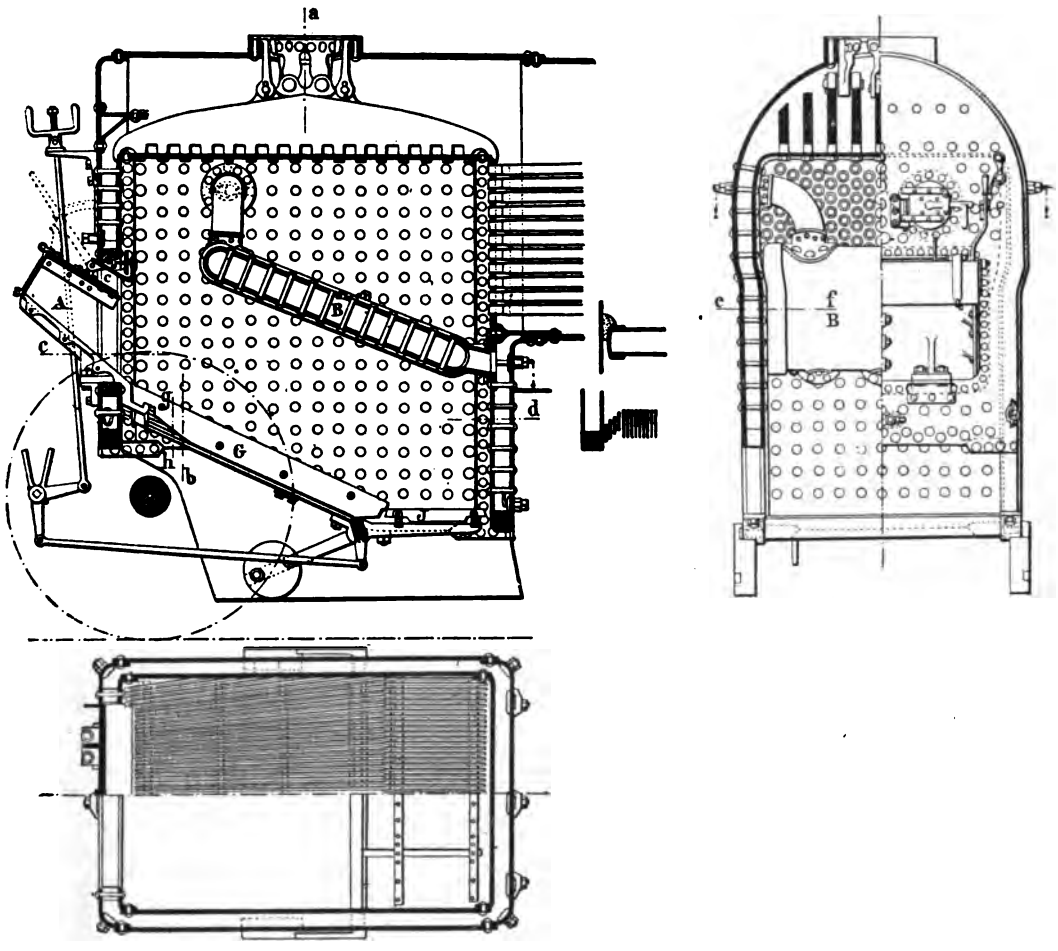


Fig. 255. — Foyer Ten Brinck de la *Compagnie d'Orléans* (machines à grande vitesse).

obtenus comme fumivorité et économie de combustible firent appliquer successivement, à la plupart des locomotives en service, ce système de foyer que reçurent toutes les machines à voyageurs construites depuis l'année 1862.

En outre de la fumivorité, le foyer Ten Brinck permet une combustion rationnelle et aussi complète que possible.

Le système de foyer Ten Brinck, en usage à la Compagnie d'Orléans, se compose essentiellement, comme l'indique la figure 255, de :

Deux grilles, dont une principale G inclinée à 25° est fixe et dont l'autre J,

plus petite et située à l'avant de la précédente, est horizontale et mobile autour d'un axe pour servir de jette-feu ;

Un gueulard en tôle et fonte A, presque aussi large que le foyer, pour le chargement de combustible et dont la sole inclinée ordinairement à 40° est placée en prolongement de la grille fixe ;

Un large clapet d'air C disposé au-dessus du gueulard et manœuvrable à volonté par un levier permettant de régler la quantité d'air à admettre dans le foyer, dans le but de brûler les gaz provenant de la distillation de la houille sur la partie supérieure de la grille fixe ;

Un bouilleur plat B, en cuivre rouge, placé au milieu du foyer à peu près parallèlement à la grille fixe et relié aux faces latérales et d'avant du foyer par quatre tubulures qui servent à la circulation de l'eau et de la vapeur en permettant aux dilatations de s'opérer librement.

Avec ces dispositions :

La houille est chargée par le gueulard ; elle glisse sur la grille fixe au fur et à mesure de sa transformation en coke, et le mâchefer produit peut s'accumuler sur le jette-feu et en être facilement extrait.

L'air est introduit par le clapet d'air au-dessus du combustible et se mélange avec les gaz ramenés à l'arrière par le bouilleur, de façon à brûler, avec un léger excès d'air, les gaz provenant de la houille qui descend de l'intérieur du gueulard. Comme organes accessoires du foyer, il faut citer :

Un cendrier fermé D muni à l'avant d'une porte, dont l'ouverture peut être graduée à volonté de la plate-forme de la machine pour régler le tirage ;

Deux ouvreaux placés à droite et à gauche au-dessus de la porte de chargement du combustible pour permettre de surveiller le feu, de le travailler au besoin avec le pique-feu, de nettoyer le dessus du bouilleur et enfin de tamponner, quand cela est nécessaire, les tubes de fumée.

Les foyers, disposés suivant le système Ten Brinck, sont de véritables gazogènes, car les gaz, provenant de la distillation de la houille sur la partie supérieure de la grille fixe, sont brûlés au retour de flamme au moyen d'une insufflation d'air, dirigée dans leur masse par le clapet du gueulard, pour les mélanger au gaz provenant de la combustion du charbon situé sur la partie inférieure de la grille fixe.

Pour obtenir la fumivorité aussi complète que possible avec ce genre de foyers, on doit :

En marche, tenir les deux grilles complètement garnies de combustible et le clapet d'air plus ou moins ouvert suivant l'intensité de la combustion, afin de brûler avec un léger excès d'air les gaz de la distillation de la houille ;

En stationnement ou lors de la fermeture du régulateur en marche, ouvrir le souffleur et réduire convenablement l'ouverture du clapet d'air.

En tous cas, le chargement du combustible doit se faire en ouvrant légèrement le souffleur ou en abaissant au besoin la porte du cendrier, et en garnissant complètement le gueulard après avoir poussé vers l'avant de la grille fixe le charbon enflammé qui n'y serait pas descendu naturellement par l'effet de l'inclinaison de cette grille et des trépidations de la marche.

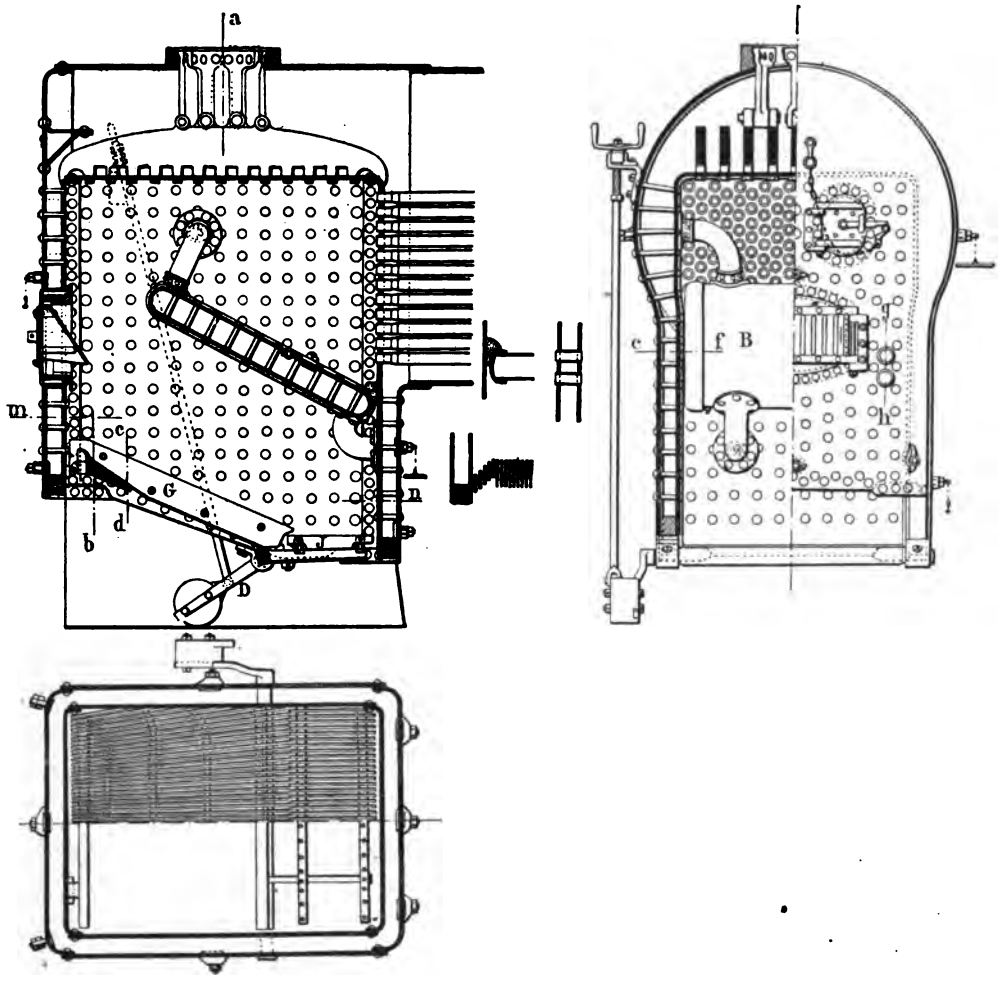


Fig. 256. — Foyer Ten Brinck-Bonnet de la *Compagnie d'Orléans* (machines a marchandises).

Pour les locomotives à marchandises, la production de fumée dans les gares ayant moins d'inconvénients que pour les locomotives à voyageurs on leur a appliqué, à la Compagnie d'*Orléans*, une disposition de foyer Ten Brinck analogue à celle qui a été proposée par M. Bonnet, ancien ingénieur des Chemins de fer de l'*Est*. La simplification de M. Bonnet avait été faite d'abord dans le but d'appliquer le système Ten Brinck aux locomotives existantes sans être forcé d'enlever, par un travail onéreux, une grande partie de

la face arrière du foyer. Cette simplification, bien que n'assurant pas la fumivorité, ayant donné en pratique des résultats assez satisfaisants pour les locomotives à marchandises et certaines locomotives mixtes, a été employée ensuite lors de la construction de locomotives neuves destinées à faire un de ces deux services.

Dans la disposition du foyer Ten Brinck-Bonnet employée à la Compagnie d'*Orléans* et dont l'ensemble est représenté par la figure 256, le gueulard est remplacé par une large porte ovale, et le clapet d'air par un registre à ouvertures verticales fixé au centre de la porte ; celle-ci est munie intérieurement d'un déflecteur ayant pour but de diriger l'air de face et de chaque côté ; en outre, pour augmenter l'insufflation d'air sur les côtés du foyer, on applique dans le système Ten Brinck-Bonnet, de chaque côté de la porte du foyer et vers la partie inférieure, deux ouvertures formées de tubes rivés qui permettent continuellement à l'air d'entrer dans le foyer.

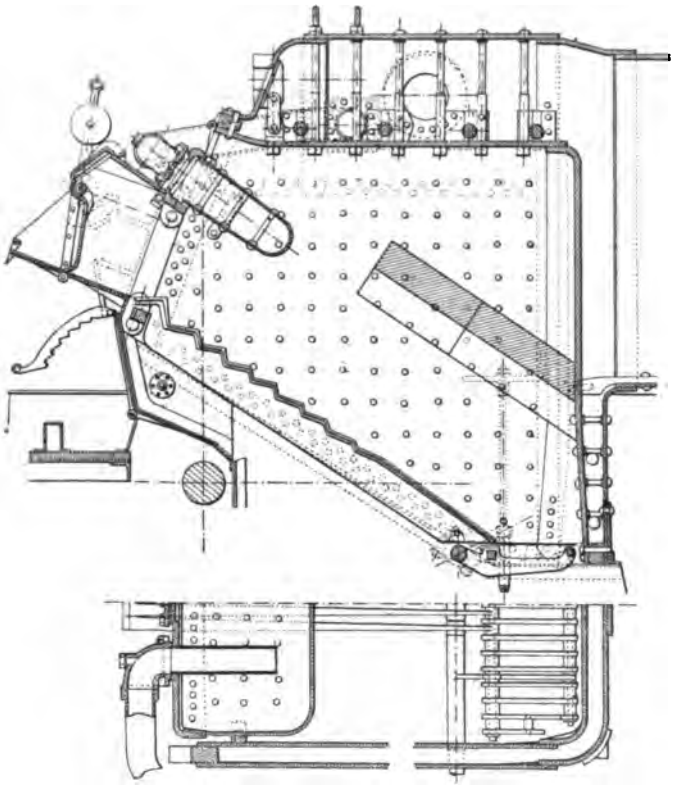


Fig. 257. — Foyer Ten Brinck autrichien, système Dormus.

Dans le foyer Bonnet, la grille fixe étant inclinée à 25° comme dans le Ten Brinck, il en résulte que sa partie supérieure est notablement au-dessous de la porte du foyer, de sorte que la couche de combustible se trouve en contact avec la partie arrière du foyer, et que la surface de chauffe directe en est par suite augmentée.

Avec la disposition de porte Bonnet, le chargement de la grille de chaque côté, à l'arrière, est plus difficile qu'avec le gueulard Ten Brinck, et il faut avoir soin, en service, de bien garnir cette porte.

On trouvera (fig. 257) la coupe longitudinale d'un foyer Ten Brinck des Chemins de l'*État autrichien*, différant surtout de celui que nous venons de décrire par la position du bouilleur qui se trouve reporté à l'arrière et

communique avec la lame d'eau formant la façade postérieure de la boîte à feu; une voûte en briques est placée dans la partie avant à l'emplacement usuel du bouilleur.

Le foyer Ten Brinck est un excellent gazogène permettant d'assurer une combustion à la fois active et économique. Toutefois, il n'est pas prouvé que son efficacité soit supérieure à celle du foyer profond muni d'une voûte en briques.

75. Comparaison de la voûte en briques et du bouilleur Ten Brinck. Leur action sur le rendement des foyers; résultats d'expérience. — Au point de vue de l'efficacité, il ne semble pas qu'il y ait entre le foyer à voûte en briques et le foyer Ten Brinck une très grande différence.

La voûte possède un avantage certain qui est d'augmenter la température à l'intérieur du foyer, le bouilleur Ten Brinck ayant au contraire l'inconvénient de la réduire; il est certain que les gaz s'enflamment moins facilement, au contact ou dans le voisinage d'une surface refroidie sur son autre face par l'eau de la chaudière, qu'à celui d'une masse portée au rouge comme l'est la voûte en briques.

D'autre part, le mélange des gaz avec l'air admis au-dessus du feu s'opère un peu mieux dans le foyer Ten Brinck parce que la projection de l'air a lieu, grâce à la grande longueur du clapet d'air, sur toute la largeur du foyer. En outre, la distillation du combustible est plus méthodique dans l'appareil Ten Brinck par suite du mode de chargement par le gueulard et de l'inclinaison de la sole et de la grille, le combustible descendant progressivement vers la partie avant où il arrive transformé en coke.

En réalité, on peut considérer que, à part la supériorité de la voûte signalée plus haut en ce qui concerne la plus haute température à l'intérieur de la boîte à feu, le foyer avec voûte en briques et déflecteur est une solution plus approximative du problème que le foyer Ten Brinck; il ne s'en suit pas que ce ne soit peut-être la meilleure en pratique car elle est un peu moins coûteuse. La voûte n'a qu'une faible durée, mais elle se remplace à bon compte; le bouilleur Ten Brinck résiste beaucoup plus longtemps, mais si son entretien est moins fréquent il peut être plus dispendieux sans compter que son prix d'établissement est très supérieur à celui de la voûte en briques. Sa construction et sa mise en place sont assez délicates et ne peuvent être effectuées que par de très bons ouvriers.

Le foyer Ten Brinck possède aussi, par rapport au foyer Bonnet ou au foyer ordinaire muni ou non d'une voûte en briques, cet inconvénient que la porte du gueulard est portée à une haute température et produit un rayonnement qui peut, en été surtout, gêner les agents du service.

L'appoint qu'apporte à la vaporisation le bouilleur Ten Brinck ne peut

être considéré comme un avantage sérieux car il entraîne un refroidissement des gaz et ce qui est vaporisé en plus dans le bouilleur l'est en moins dans les tubes.

Bref, on peut résumer en quelques mots les avantages relatifs de chaque système. Avec la voûte en briques, la température du foyer est plus élevée et la combustion des gaz peut s'opérer plus complètement. Avec le foyer Ten Brinck, la distillation du combustible est plus méthodique et le mélange des gaz avec l'air plus complet. La voûte en briques demande un entretien plus fréquent mais peu dispendieux; son prix d'établissement est en outre moins élevé.

D'ailleurs, l'emploi du bouilleur Ten Brinck n'est pas nécessairement lié à celui du foyer spécial décrit plus haut. Il peut s'appliquer aux foyers ordinaires à la place d'une voûte en briques, mais nous ne voyons plus alors les avantages qu'il peut présenter.

Il semble parfaitement rationnel qu'une Compagnie dont presque toutes les machines sont munies depuis longtemps du foyer Ten Brinck, dont le personnel est parfaitement fait à la construction, à l'entretien et au service de cet excellent appareil en continue l'emploi; mais pour les nouvelles applications à des locomotives existantes ou destinées à des réseaux sur lesquelles le Ten Brinck constiturait une nouveauté, l'emploi de la voûte en briques paraît plus logique et plus facile.

Les expériences méthodiques de la Compagnie de *Lyon* dont nous avons parlé plus haut ont permis de chiffrer, par des résultats numériques, les avantages absolus et relatifs de la voûte en briques et du bouilleur Ten Brinck appliqués aux foyers ordinaires. Nous les résumons ci-dessous :

1° A tirage égal, l'activité de la combustion diminue un peu quand on emploie la voûte en briques ou le bouilleur Ten Brinck; c'est la voûte longue qui la réduit le plus. Le Ten Brinck et la voûte courte ont sensiblement le même effet;

2° A tirage égal, la voûte longue diminue toujours la vaporisation totale ou la puissance de la chaudière d'autant plus que les tubes sont plus longs. La voûte courte la diminue pour les tubes longs et l'augmente pour les tubes courts; il y a sensiblement équilibre pour les tubes de 4 m. à 4,50 m. Le Ten Brinck agit comme la voûte courte, mais plus énergiquement; l'équilibre est obtenu seulement avec des tubes de 5 m.; au-dessous de cette longueur, la présence du Ten Brinck augmente la vaporisation[1]. Avec les tubes courts et le tirage de 45 mm. cette augmentation varie de 3 à 5 0/0. En général les

[1] Cela semble naturel *a priori;* les gaz sortant moins chauds du foyer Ten Brinck, il n'est pas nécessaire que les tubes soient aussi longs.

grands tirages réduisent les écarts et atténuent un peu l'influence de la longueur des tubes;

3° La voûte longue augmente d'autant plus le rendement économique (vaporisation par kilogramme de combustible), que les tubes sont plus courts et le tirage plus énergique; la voûte courte agit dans le même sens, mais moins fortement; le Ten Brinck a sensiblement le même effet que la voûte longue. Au tirage de 45 mm. et pour les tubes moyens, la voûte courte donne une amélioration de 6 0/0, la voûte longue et le Ten Brinck de 8 0/0. L'amélioration atteint 9 et 12 0/0 pour les tubes de 3 m. seulement;

4° La présence, dans le foyer, d'une voûte ou d'un bouilleur Ten Brinck diminue beaucoup la quantité d'escarbilles entraînées par le tirage; c'est la voûte longue qui a le plus d'effet, puis la voûte courte, enfin le Ten Brinck; mais, aux tirages ordinaires, l'effet est sensiblement le même pour les trois appareils; le poids d'escarbilles est réduit par eux de 45 0/0;

5° La voûte en briques ou le bouilleur améliorent la combustion; l'effet des trois appareils semble être le même à ce point de vue.

Ils diminuent l'influence de l'activité du tirage sur le rendement de la combustion. On peut dire, somme toute, que la perfection de la combustion ne varie plus sensiblement avec le tirage quand le foyer est muni d'une voûte ou d'un bouilleur;

6° L'emploi de la voûte ou du bouilleur diminue la température des gaz à l'intérieur de la boîte à fumée; les effets de la voûte longue et du Ten Brinck sont sensiblement les mêmes et se traduisent par une diminution moyenne de 4 à 6 0/0 du nombre de degrés; toutefois la voûte courte ne donne que 1 à 3 0/0 de réduction;

7° L'addition de la voûte ou du bouilleur augmente nettement le rendement total de la chaudière, sauf de rares exceptions qui ne se présentent qu'avec des tubes longs. L'augmentation relative est d'autant plus grande que les tubes sont plus courts et le tirage plus élevé; elle varie de 0 à 11 0/0. L'influence du Ten Brinck est la même que celle de la voûte longue et plus grande que celle de la voûte courte. Pour les tubes de 4 m. à 4,50 m. et les tirages ordinaires, l'avantage du Ten Brinck et de la voûte longue est de 5 0/0 et celui de la voûte courte de 4 0/0 par rapport au foyer ordinaire.

Ainsi, en résumé, il convient d'ajouter dans le foyer une voûte en briques, de longueur modérée afin de ne pas trop diminuer l'action du tirage, ou un bouilleur Ten Brinck. L'avantage de ces appareils est d'assurer une meilleure combustion et surtout de rendre l'utilisation moins sensible à d'importantes variations de l'activité de la combustion; ils suppriment presque complètement les pertes dues à une combustion incomplète quand le feu est très poussé. Le Ten Brinck serait un peu plus avantageux que la voûte en briques courtes, mais il présente sous le rapport de l'en-

tretien des inconvénients qui semblent compenser ses avantages économiques.

76. Chambre de combustion. — Certaines chaudières locomotives sont munies d'une chambre de combustion formant un prolongement, vers l'avant, de la boîte à feu dont elle est ordinairement séparée par un autel en briques. L'avantage reconnu de cette disposition est d'augmenter le parcours que les gaz ont à effectuer avant de pénétrer à l'intérieur du faisceau tubulaire, de faciliter leur brassage et de permettre une combustion un peu plus satisfaisante. La chambre de combustion est le complément indispensable des foyers très plats destinés à brûler des menus ou des charbons maigres, mais son utilité est contestable pour les autres foyers. Elle a d'autre part l'inconvénient d'augmenter la longueur, le prix et le poids des chaudières.

La voûte en briques et le bouilleur Ten Brinck déterminent, à l'intérieur des foyers dans lesquels ils sont placés, une véritable chambre de combustion, s'étendant entre leur face antérieure inclinée et la plaque tubulaire, suffisante dans la pratique.

M. Webb a fait construire, pour ses machines express compound du dernier modèle (type *Greater Britain*), des chaudières comportant, vers le milieu du corps cylindrique, très long, une chambre de combustion d'où on peut retirer les escarbilles à l'aide d'une trémie placée à la partie inférieure, qui communique avec le foyer par une série de gros tubes et avec la boîte à fumée, par un faisceau composé de tubes du diamètre ordinaire. Cette chambre de combustion semble bien éloignée du foyer pour que la combustion des produits gazeux s'y effectue convenablement, d'autant plus qu'ils sont beaucoup refroidis par leur passage à travers le premier faisceau tubulaire.

77. Foyers en briques réfractaires. — La surface de chauffe directe formée par les parois du foyer fournit à la vaporisation des locomotives un appoint considérable ; bien que formant tout au plus le douzième de la surface totale, elle produit souvent le quart du poids total de vapeur. La transmission rapide et active, à travers ces parois, des calories nécessaires à la vaporisation de cette quantité considérable de vapeur, entraîne nécessairement un abaissement de la température du foyer que l'on est généralement d'accord pour considérer comme défavorable à une bonne combustion (nous avons vu cependant que ce fait est aujourd'hui contesté).

Certains ingénieurs ont d'abord cherché à revêtir de briques réfractaires les parois intérieures du foyer pour les protéger de l'action de la flamme et augmenter la température. C'est une disposition fréquemment adoptée, entre autres pour les boîtes à feu des locomotives chauffées au pétrole ; la voûte en

briques peut être considérée comme une application restreinte du même principe. Dans la suite, quelques inventeurs ont trouvé qu'il serait plus simple de supprimer entièrement la boîte à feu qui n'avait plus guère de raison d'être du moment que la production de ses parois, protégées du rayonnement direct, se trouvait très diminuée, et de la remplacer par un foyer en briques réfractaires d'où les gaz s'échappent à travers le faisceau tubulaire.

La suppression de la surface directe n'entraîne aucune perte de calorique car la vaporisation se trouve plus active dans les tubes où les produits de la combustion pénètrent à une haute température; ils ne s'en échappent pas plus chauds si le faisceau présente une longueur suffisante. En réalité, la surface directe ne possède aucune particularité spéciale et l'expérience prouve qu'on peut en remplacer telle portion que l'on veut par une surface tubulaire équivalente sans que le rendement ou la production de la chaudière diminue.

Les foyers en briques réfractaires offrent tout au moins un avantage en ce qui concerne le prix de revient, car ils dispensent de la partie la plus difficile à exécuter de la chaudière locomotive. Malgré d'assez bons résultats économiques obtenus sur quelques réseaux dans des expériences isolées, ils ne se sont pas répandus encore parce qu'ils présentent quelques inconvénients et nécessitent un entretien, sinon très dispendieux du moins fréquent.

Un des premiers foyers de ce genre est, croyons-nous, celui de M. Werderber, appliqué vers 1879 à une locomotive de l'*État hongrois* (fig. 259) Le corps cylindrique, qui constitue à lui seul toute la chaudière, pénètre d'environ 0,50 m à l'intérieur d'une boîte à feu en briques affectant, du moins à l'extérieur, la forme de la boîte à feu ordinaire.

Le même système de foyer a été appliqué à des locomotives de l'*État prussien* (Direction d'Erfurt) et ont donné en service de meilleurs résultats qu'au cours des essais.

L'administration des chemins de fer de l'*État autrichien* a également appliqué à une locomotive-tender un foyer du même genre qui s'est toujours bien comporté. Pour augmenter la chambre de vapeur réduite par la suppression de la boîte à feu, on a ajouté au-dessus du corps cylindrique un long réservoir de section circulaire qui lui est relié par plusieurs tubulures en tôle.

Le foyer Borck a été appliqué en 1893 à une locomotive à marchandises de l'*État saxon* et a donné de bons résultats. La consommation de charbon est la même qu'avec les foyers ordinaires tandis que les prix d'établissement et les dépenses d'entretien sont, paraît-il, plus faibles. L'entraînement des escarbilles est moins considérable. Ce foyer ne diffère pas matériellement du précédent dont il se distingue surtout par la présence de trois

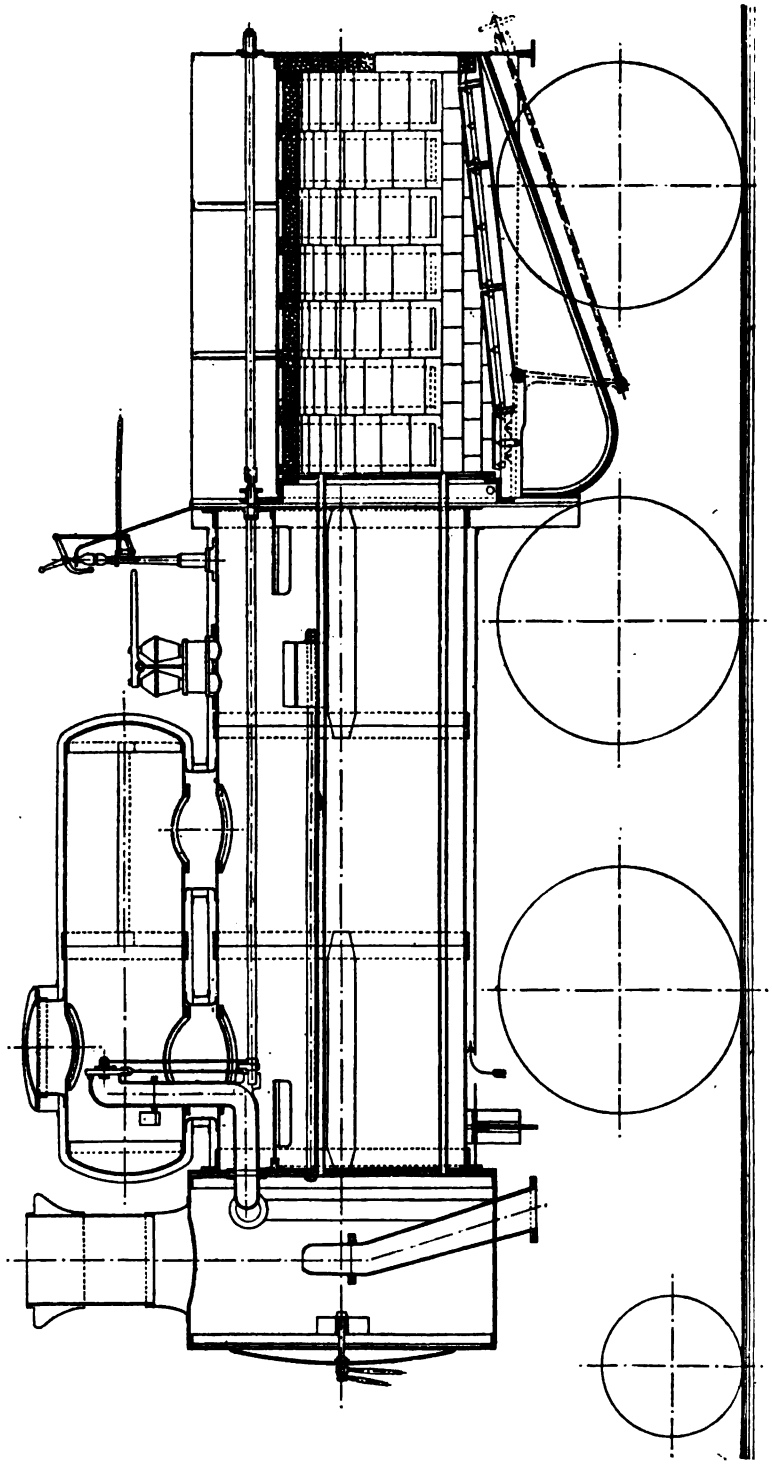


Fig. 258. — Chaudière avec foyer en briques, système Docteur, appliquée à la locomotive n° 512 de l'*État belge*.
(D'après le *Traité de la machine à vapeur* de M. E. Sauvage.)

bouilleurs cylindriques, celui du milieu de plus grand diamètre, reliés par

leurs extrémités antérieures à la plaque tubulaire arrière du corps tubé — leurs axes correspondant sensiblement au niveau moyen de l'eau — et qui se prolongent vers l'arrière, jusqu'à la façade postérieure du foyer, en formant le ciel de la boîte à feu. Cette solution ne semble pas présenter un grand avantage sur les précédentes et offre une complication plus grande.

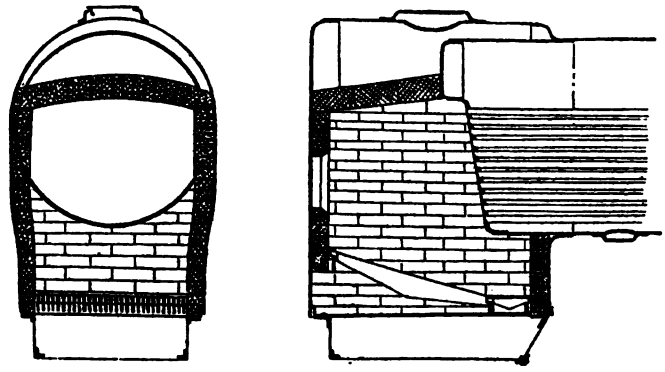


Fig. 259. — Foyer Werderber.

L'administration des chemins de fer de l'*État belge* a mis en service, en 1894, une machine à six roues couplées (n° 512), à grande grille, munie d'un foyer à parois réfractaires d'un nouveau type (système Docteur) (fig. 258) qui paraît constituer à différents points de vue un perfectionnement sur ses devanciers. Ce foyer, extérieurement, ne se distingue pas des boîtes à feu ordinaires. Il se compose d'un berceau en briques creuses entouré d'une enveloppe en tôle avec interposition d'un matelas d'air, et formant le prolongement du corps cylindrique qui, à lui seul, forme toute la chaudière. La grille est élargie comme dans les machines similaires de la même administration et passe au-dessus des roues. Pour suppléer à la réduction du volume de la chambre de vapeur résultant de la suppression de toute la partie correspondant à la boîte à feu, M. Docteur a placé sur l'avant du corps cylindrique un réservoir horizontal de grand volume, remplaçant le dôme, relié à la chaudière par deux tubulures. Une des particularités du système et non la moins avantageuse consiste dans une circulation, effectuée à l'intérieur des briques creuses formant l'enveloppe du foyer, d'une partie de l'air destiné à la combustion et qui est introduit à quelque distance au-dessus du combustible à l'aide d'ouvertures oblongues pratiquées dans les parois latérales.

M. Docteur[1] a surtout eu en vue, en appliquant ce dispositif, de diminuer les frais d'établissement en remplaçant la partie la plus dispendieuse de la chaudière par une simple maçonnerie. L'économie réalisée suivant lui à ce point de vue serait de 5 000 fr. environ. Le renouvellement complet des briques du foyer coûterait 100 fr. — matières et main d'œuvre — et pourrait être effectué en trois jours par un maçon ordinaire.

L'expérience n'a pas encore consacré les foyers en briques et il peut se

[1] Le mémoire de M. Docteur a paru dans la *Revue industrielle des Mines*.

faire qu'elle révèle à la longue des inconvénients; mais on ne peut s'empêcher de les considérer comme offrant en principe de grands avantages et comme donnant une solution assez séduisante. Le foyer Docteur par exemple, qui est pour le moment le plus simple et le mieux combiné de cette classe, présenterait les avantages suivants :

Il coûte moins cher d'établissement et peut-être d'entretien ; il ne nécessite en tous cas, pour ses réparations, ni machines spéciales, ni ouvriers habiles.

Il permet une combustion un peu meilleure du charbon grâce à la haute température qui y règne normalement (sous la réserve faite plus haut) et aux rentrées d'air chaud au-dessus de la grille, lesquelles réduisent en outre l'entraînement du combustible. La température des gaz à leur entrée dans la boîte à fumée ne se trouve pas supérieure, lorsque la chaudière n'est pas forcée, à ce qu'elle est dans les chaudières à foyers ordinaires du même type (environ 380°). Les rentrées d'air chaud semblent un complément intéressant de ce genre de foyer ; leur suppression se traduit immédiatement par une diminution de la production de vapeur et par une augmentation de la consommation de combustible. D'autre part, les rentrées d'air froid doivent être évitées avec soin, car elles peuvent amener une destruction rapide de l'enveloppe en briques, surchauffée. De même on doit prendre certaines précautions lors des rentrées au dépôt et éviter les refroidissements trop brusques de la boîte à feu amenant des contractions qui font fendre les briques. Ce foyer est fumivore à un haut degré, la température y étant assez élevée et les rentrées d'air chaud assez importantes pour assurer en tous temps la combustion immédiate du carbone des hydrocarbures. Les fragments de charbon, aussitôt introduits dans le foyer, deviennent incandescents et ne distillent pas lentement comme dans les boîtes à feu ordinaires. La vaporisation de la chaudière de la machine 512 s'est élevée à 8,5 et 9 kg. par kilogramme de charbon avec tirage modéré ; elle n'est pas descendue au- dessous de 7,5 kg. même avec l'emploi de houilles fines et de médiocre qualité.

Un tel foyer présente une très grande sécurité, puisque toutes les parties planes sont supprimées, et se prête à l'emploi des plus hautes pressions, la chaudière proprement dite ne se composant plus que d'un corps cylindrique et de tubes.

Grâce au refroidissement dû aux lames d'air circulant à travers les briques et à la couche d'isolant interposé, l'enveloppe extérieure du foyer est à une température assez basse pour que l'on puisse y tenir la main.

L'enveloppe en briques a d'ailleurs un avantage incontestable qui est de régulariser la température du foyer et par conséquent l'afflux de calorique. Au moment des charges, elle réduit l'abaissement de température en provoquant l'allumage et la distillation très rapide du combustible ; quand l'allure du feu est très active, elle absorbe, grâce à sa masse, une notable partie de

l'excès de calorique dégagé qu'elle restitue lorsque l'activité de la combustion diminue.

Le berceau formé de briques et constituant l'enveloppe du foyer ne semble pas souffrir des trépidations.

D'autre part, des foyers de ce genre ne sont pas sans inconvénients.

Les briques se vitrifient, se fendent et se délitent assez rapidement, nécessitant des réparations qui, si elles sont faciles et peu coûteuses comme nous l'avons vu, sont assez fréquentes et peuvent immobiliser trop souvent la machine. Il est à craindre que, par suite de la vitrification ou de la déformation des briques, les carneaux d'arrivée d'air, dans le système Docteur, ne viennent à s'obstruer rapidement.

A égalité de consommation de charbon, on doit marcher avec un échappement plus serré et une plus grande contrepression sur les pistons parce que, les gaz se trouvant à une température plus élevée de 300 à 400°, leur volume est plus grand (de 30 à 40 0/0) que dans les foyers ordinaires.

La vaporisation extrêmement active de la première portion du faisceau tubulaire se produit moins facilement que sur le ciel du foyer ordinaire qui est plus libre et dégagé. Il peut se produire d'importantes poches de vapeur amenant des coups de feu aux tubes ou des fuites aux plaques tubulaires.

Le volume de la chambre de vapeur de la chaudière est diminué, ce qui n'a pas grand inconvénient d'autant plus que l'on peut y remédier, comme dans la chaudière de l'*État belge*, en y ajoutant au-dessus du corps cylindrique un réservoir de vapeur important. Ce qui est plus grave, c'est que la surface du plan de vaporisation est réduite, toute la partie correspondant au foyer se trouvant supprimée ; il peut en résulter des ébullitions et des entraînements d'eau nuisibles et importants. De même le volume d'eau est réduit, ce qui oblige à une alimentation continue et peut rendre la conduite de la machine un peu plus difficile.

Les dépôts se précipitent sur le premier tiers de la longueur des tubes où il est moins facile de s'en débarrasser que sur le ciel ou les côtés du foyer.

La température du foyer étant très élevée, une grande partie des scories est portée à l'état pâteux et vient, entraînée par le tirage, se déposer sous forme de nids d'hirondelles sur la plaque tubulaire.

En résumé, les foyers à parois en briques paraissent avoir de sérieux avantages qui peuvent contre-balancer leurs inconvénients ; ils coûtent moins cher que les foyers ordinaires et sont fumivores. Seule la question d'entretien n'est pas encore résolue et le doute qui règne encore à cet égard ne permet pas de présenter à leur endroit des conclusions formelles. Il semble cependant que ces foyers peuvent être appelés à se répandre. En les combinant avec l'emploi des tubes à ailettes, on pourrait obtenir des chaudières simples, peu coûteuses, et permettant l'emploi des hautes pressions et de combustibles spéciaux.

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de développer des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de développer des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur ; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de développer des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de développer des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur ; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de développer des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur ; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

78. Activité de la combustion. — Une des premières conditions qui s'imposent à la locomotive étant une production abondante de vapeur par unité de poids, il est nécessaire que la combustion y soit poussée avec la plus grande activité.

Or, cette activité peut être appelée à atteindre une valeur considérable parce que les locomotives ont à développer une quantité extrêmement variable de travail et que l'on ne saurait en proportionner tous les éléments en vue de la production facile de la puissance maximum, ce qui entraînerait à exagérer leur poids et leur prix.

La capacité de vaporisation dépend des dimensions absolues de la chaudière, de sa surface de chauffe et surtout de sa surface de grille, de la qualité du combustible employé et de la quantité de ce combustible qui est brûlée par unité de surface de grille. Aussi, quand on compare les éléments des chaudières appartenant aux locomotives en service dans les différents pays, ne faut-il pas perdre de vue que les dimensions absolues des chaudières ne sont qu'une indication générale et que, suivant la pratique suivie ou la nature du charbon, une grille de surface donnée peut être capable de dévevelopper des puissances très différentes, à l'allure considérée de part et d'autre comme l'allure forcée. S'il en était autrement, la surface de grille constituerait l'élément le plus capable de servir de base à la comparaison des différentes locomotives sous le rapport de la puissance ; mais ce n'est pas la surface de grille, c'est la quantité de combustible qui s'y trouve brûlée par unité de temps qui doit servir de mesure. Ainsi la grille d'une machine anglaise, ayant 1,60 m² de surface, sur laquelle on brûlera du charbon de Cardiff ou du Derbyshire en couche épaisse, sera sensiblement équivalente à une grille de 2,10 m² à 2,30 m² recevant du tout-venant en couche plus mince. Autrement dit, ce que l'on doit considérer, c'est moins la surface de grille que le cube de combustible pouvant être utilement contenu à tout instant dans le foyer.

La chaudière locomotive fonctionne normalement à tirage forcé. Cela veut dire que l'appel de l'air nécessaire à la combustion est produit, non par l'ascension naturelle des gaz chauds dans la cheminée, mais par un moyen artificiel permettant, non seulement de suppléer à la faible hauteur de la cheminée, mais encore de créer un tirage beaucoup plus intense que celui qui suffit aux chaudières fixes, et nécessaire pour obtenir, sous un faible poids, une production de vapeur abondante, condition primordiale dont dépend l'existence même de la locomotive.

Dans les torpilleurs et autres bâtiments fonctionnant aussi à tirage forcé, la dépression nécessaire pour assurer, à travers les grilles, le passage d'un volume suffisant d'oxygène, est obtenue par le refoulement de l'air, à l'aide de ventilateurs qu'actionnent des moteurs indépendants, soit dans

la chaufferie elle-même, hermétiquement close, soit dans des cendriers fermés.

Dans la locomotive, le tirage est produit, par aspiration, d'une manière plus simple et plus efficace aussi. La vapeur, après s'y être partiellement détendue, sort des cylindres, on le sait, en vertu de la force expansive qu'elle possède encore, avec une vitesse considérable que l'on utilise pour produire le tirage. A cet effet, on dirige le jet d'échappement de bas en haut dans la cheminée suivant son axe. La locomotive doit en réalité son existence à cette disposition merveilleusement simple, automatique, en somme peu coûteuse, qui a communiqué à son régime l'élasticité nécessaire, établissant entre la dépense et la production un équilibre dont la rupture ne survient que dans des cas un peu exceptionnels ou par suite d'une mauvaise proportion ou disposition de la tuyère d'échappement, inconvénients auxquels on peut facilement remédier.

Lorsque, la machine étant au repos, la dépense utile de vapeur est nulle, le tirage, n'étant pas activé par l'échappement, devient très faible et l'intensité de la combustion se ralentit au point que la vaporisation reste à peine suffisante pour compenser les pertes extérieures par rayonnement. Il ne peut guère en être autrement qu'en cas d'arrêt subit de la machine après une marche à toute vapeur de quelque durée, par exemple sur une longue et forte rampe. L'intensité du feu, activée par la violence des coups d'échappement, ne peut, surtout si le foyer est bien garni, brusquement cesser dès que le régulateur est fermé. Pendant quelques instants, il y a surproduction de vapeur ; la pression tend à monter et les soupapes de sûreté peuvent entrer en jeu. Mais bientôt le développement d'énergie calorifique se ralentit et les choses rentrent dans l'ordre. Si l'arrêt doit être de quelque durée, il est parfois nécessaire, pour diminuer encore le tirage, de fermer les portes du cendrier et d'ouvrir, partiellement tout au moins, la porte du foyer.

Dès que la machine doit se remettre en route, l'ouverture du régulateur entraîne une dépense subite de vapeur et par conséquent de calorique emprunté, dans les premiers instants surtout, à la réserve disponible, autrement dit à l'énergie calorifique emmagasinée dans l'eau chaude que contient la chaudière. La pression tend tout d'abord à baisser, la perte de chaleur n'étant pas intégralement réparée, vu la faible activité du feu. Mais cet état de choses est de courte durée ; les premiers coups d'échappement ravivent le feu et la combustion reprend son activité normale après quelques tours de roue. A partir de ce moment, il s'établit un régime régulier sur lequel le mécanicien exerce d'ailleurs un contrôle efficace en réglant la conduite de son feu et l'ouverture des portes du cendrier ou des soupapes d'échappement variable quand la machine en est munie.

La variabilité, à la volonté du mécanicien, de la section de la tuyère

d'échappement, n'est pas à vrai dire indispensable, et la grande majorité des locomotives, à l'étranger tout au moins, ne comporte aucun dispositif propre à l'assurer. C'est en effet une heureuse propriété du système que, la section de la tuyère restant constante, la violence de l'échappement et, par conséquent, l'intensité du tirage et l'activité de la vaporisation, sont sensiblement proportionnels à la dépense de vapeur. En effet, au moment du démarrage, ou quand la machine remorque lentement une charge très lourde, le degré d'admission dans les cylindres et par conséquent les contrepressions étant élevées, les coups d'échappement sont très violents mais espacés ; chacun d'eux produit, à l'intérieur de la boîte à fumée, une dépression maximum ; mais, dans l'intervalle de ces dépressions successives, le vide partiel produit par l'échappement est détruit. Il en résulte que l'intensité *moyenne* du tirage à cette allure n'est pas maximum, non plus d'ailleurs que la dépense de vapeur, moindre qu'à l'allure rapide avec une introduction plus faible. Quand au contraire la locomotive se meut à grande vitesse, la production de vapeur doit normalement atteindre son maximum bien que la période d'introduction aux cylindres soit minimum. Le nombre de tours augmente en effet plus vite que la puissance par tour ne diminue. A cette allure, les coups d'échappement, considérés isolément sont en principe moins énergiques[1] puisque, par suite de la détente prolongée de la vapeur, la pression à l'évacuation est moindre ; mais en revanche ils se produisent d'une manière presque continue et l'intensité moyenne du tirage est plus grande que précédemment ; la production de vapeur se trouve donc activée dans la mesure nécessaire.

L'échappement variable n'est en réalité utile que comme auxiliaire pour les chauffeurs insuffisants auxquels il donne un moyen de réparer un moment d'inattention lorsqu'ils ont, par négligence, laissé tomber le feu et la pression quelques instants avant que la machine ait à donner un coup de collier. Le serrage de l'échappement permet alors de pousser l'activité du feu au delà de ce qui serait nécessaire pour subvenir à la seule production du moment. On peut déterminer ainsi une surproduction capable de combler le déficit. C'est là, d'ailleurs, une question importante sur laquelle nous reviendrons dans un autre chapitre.

Il est impossible de poser, en ce qui concerne le tirage, des lois absolues et l'on doit faire entrer en ligne de compte les proportions de la chaudière, la disposition plus ou moins satisfaisante de la tuyère d'échappement, la nature du combustible employé. D'autre part, il est bien évident que cet équilibre entre la production et la dépense ne peut subsister qu'entre certaines limites

[1] On doit cependant noter que la pression dans le tuyau d'échappement peut atteindre sa valeur maximum pendant la marche à grande vitesse, soit parce que ce tuyau est insuffisant pour débiter, sans une perte de charge importante, toute la vapeur qui traverse les cylindres, soit par suite de la plus grande avance à l'échappement.

comprenant toutes les phases du fonctionnement pratique des machines. Si l'on veut, au delà d'une certaine limite un peu indéterminée et variable selon la nature du combustible employé ou le mode de chauffe adopté, forcer l'allure de la machine, le tirage, ou bien augmente d'une trop faible quantité, et n'est plus suffisant pour assurer la production correspondante, ou bien croît en rapport avec la dépense, mais atteint alors une valeur absolue telle que le combustible se trouve entraîné et que la vaporisation n'augmente pas, malgré la consommation plus considérable de charbon, l'utilisation de la chaudière étant inversement proportionnelle à la vitesse dont sont animés les produits de la combustion en contact avec les surfaces de chauffe. Autrement dit, on arrive alors, à la limite, à brûler plus de charbon mais sans produire sensiblement plus de vapeur.

L'activité de la combustion varie à tout instant dans les locomotives, avec la puissance nécessaire, suivant la vitesse et le profil. Elle ne peut être à peu près constante que sur les lignes ne comportant pas de rampes ou présentant une inclinaison continue et régulière et sur lesquelles le passage des points spéciaux de la voie et des bifurcations n'oblige pas à ralentir. Ces conditions ne se rencontrent que très rarement. Encore faut-il prévoir que ces machines puissent remorquer des charges différentes, ce qui implique quand même des variations éventuelles du travail. On doit donc en général considérer le foyer de la locomotive comme susceptible d'une production moyenne donnée et comme devant être capable de brûler momentanément, pour faire face à un accroissement de vitesse ou de charge, pour monter une rampe, une quantité beaucoup plus considérable de combustible par unité de temps.

On peut considérer que, en général, les locomotives express employées en France brûlent en moyenne, lorsqu'elles assurent le service des trains rapides et lourds, de 300 à 450 kg. de charbon par heure et par mètre carré. Ainsi, une machine possédant une grille de 2 m² et consommant 11 kg. de charbon par kilomètre, brûlera en moyenne, à la vitesse de 75 kilomètres, 412 kg. de combustible par heure et par mètre carré de grille. Les machines munies d'une voûte en briques ou d'un foyer Ten Brinck brûlent un peu plus (470 à 500 kg. par heure et mètre carré de grille à la Compagnie d'*Orléans*), dans de bonnes conditions économiques. La production maximum est notablement supérieure à ces chiffres et peut atteindre parfois, pendant un temps plus ou moins long, 600 et même 700 kg. par heure et mètre carré de grille. Il est d'ailleurs difficile de donner des chiffres absolus, l'activité de la combustion dépendant de la surface de grille, souvent assez variable, adoptée pour un service déterminé et de la nature du combustible, à ne pas parler du système du foyer et du mode de chauffe suivi.

En Angleterre, on va plus loin dans cette voie; les surfaces de grille sont

assez faibles (beaucoup de machines remorquant, à la vitesse commerciale de 80 km. à l'heure, des trains d'un poids net de 180 à 200 t., n'ayant que des grilles de 1,70 m² de surface sur lesquelles on brûle un excellent combustible en couche épaisse avec de fortes rentrées d'air par la porte). On atteint ainsi fréquemment une combustion de 800 à 900 kg. de charbon par mètre carré de grille et par heure.

Aux États-Unis, où les machines se trouvent ordinairement très forcées parce que les trains sont lourds et que, le prix du charbon étant peu élevé (moins de 4 à 5 fr. la tonne dans certaines régions), on recherche peu l'économie, on brûle jusqu'à 1 000 kg. et 1 100 kg. par heure et mètre carré.

Au contraire, avec les houilles menues ou très maigres on ne peut effectuer la chauffe qu'en couche mince et en modérant beaucoup le tirage pour éviter l'entraînement du combustible. Ainsi, dans les grands foyers belges du type Belpaire, on ne dépasse guère une combustion de 250 à 270 kg. par heure et mètre carré de grille. C'est aussi à peu près la limite atteinte en Amérique avec les foyers Wootten brûlant de l'anthracite en noisettes ou menue.

Rapport entre la dépression dans la boîte à fumée et la quantité de charbon brûlé par unité de temps et de surface de grille. — Influence de la longueur des tubes, de la voûte en briques, du bouilleur Ten Brinck. — Les relations entre les dépressions dans la boîte à fumée et l'activité de la combustion ne peuvent être étudiées analytiquement dans l'ignorance où l'on est encore de la valeur des coefficients.

On devra noter d'ailleurs que, suivant la disposition du foyer, la longueur, le nombre ou le diamètre des tubes, selon que le foyer comportera ou non soit un bouilleur Ten Brinck soit une voûte en briques, c'est-à-dire suivant la valeur des résistances opposées au courant gazeux entre son point d'origine et la boîte à fumée, des tirages de même intensité correspondront, comme on pourra d'ailleurs s'en rendre compte d'après les tableaux suivants, à des quantités assez variables de combustible brûlé par heure et par unité de surface de grille.

Nous ne pouvons que donner quelques résultats d'expériences propres à fixer les idées à ce sujet; malheureusement, les essais de locomotives dans lesquels on ait à la fois noté les dépressions et les quantités de charbon brûlées par unité de temps et de surface de grille sont encore assez rares.

On trouvera ci-dessous le résumé des principaux résultats relevés au cours des expériences des Compagnies du *Nord* et de *P.-L.-M.*, du *Great Eastern Railway* et de M. Goss à l'université de Purdue.

Expériences de M. Geoffroy; Compagnie du Nord (1860).

DÉPRESSION dans la boîte à fumée en millimètres d'eau.	COMBUSTIBLE consommé par heure en kilogrammes.	DÉPRESSION dans la boîte à fumée en millimètres d'eau.	COMBUSTIBLE consommé par heure en kilogrammes.	DÉPRESSION dans la boîte à fumée en millimètres d'eau.	COMBUSTIBLE consommé par heure en kilogrammes.
Coke. Tous les tubes ouverts.		*Briquettes. Tous les tubes ouverts.*		*Briquettes. La moitié des tubes bouchés.*	
20	198	20	216	20	176
40	297	40	337	40	277
60	330	60	419	60	321
80	360	80	465	80	360
100	350	100	444	100	385

Essais de la Compagnie de Lyon (1885-90). *Chaudière d'expérience.*

(*a*) Tubes lisses en laiton.

Tirages de millimètres . .	LONGUEURS des tubes.	CHIFFRES ABSOLUS											
		FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			BOUILLEUR Ten Brinck.		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
	Mètres.												
N° 1. — Combustible brut brûlé par heure en kilogrammes. (Activité de la combustion) *Surface de grille : 2 m² 34.*	7	353	504	668	305	438	580	»	»	»	301	442	586
	6	370	525	697	318	452	594	349	488	639	327	471	618
	6	404	565	752	350	488	632	377	522	680	385	530	688
	4,50	428	590	786	374	513	658	405	551	709	415	564	726
	4	449	615	817	395	532	678	432	580	740	439	588	753
	3,50	462	636	844	405	545	692	448	599	765	443	600	770
	3	466	650	863	411	552	704	451	608	778	446	607	780

(*b*) Tubes en laiton à ailettes.

Tirages de. . .	LONGUEURS des tubes.	TUBES A AILETTES DE 50 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR										TUBES A AILETTES DE 65 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR									
		VOUTE DE 1,212 m.					BOUILLEUR TEN BRINK					VOUTE DE 1,212 m.					BOUILLEUR TEN BRINK				
		25	45	75	100	120	25	45	75	100	120	25	45	75	100	120	25	45	75	100	120
	m.																				
N° 17. — Combustible brut brûlé par heure en kilogrammes. (Activité de la combustion.)	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	440	580	730	834	895	430	565	718	815	879
	3,50	338	470	600	690	747	»	»	»	»	»	445	589	742	859	935	435	572	725	825	905
	3	345	483	620	720	780	»	»	»	»	»	460	612	775	910	999	445	600	763	872	960
	2,50	395	524	672	780	842	395	525	700	820	900	470	635	800	925	1 025	451	610	778	886	980
	2	408	540	690	800	876	428	565	715	828	907	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Chaudières des locomotives compound type P.-L.-M., 1889.

Tirages en millimètres	25	45	75	100
Consommation totale de charbon par heure. Machines C-1	427	564	708	820
— C-2	415	540	683	780
— 3 201	445	580	732	848
— 4 301	524	668	865	1 018

Expériences de M. Kennedy (1887)[1].
(Great Eastern Railway.)

	1	2	3
Longueur des tubes	2,87 m.	2,87 m.	2,87 m.
Épaisseur moyenne du combustible sur la grille.	0,125 à 0,150 m	0,100 à 0,125 m.	0,125 m.
Tirage en millimètres d'eau à la base de la cheminée	26,1 mm.	27,8 mm.	32,5 mm.
Charbon brûlé par heure et mètre carré de grille. (Voûte en briques.)	173 kg.	136 kg.	155 kg.

Expériences de M. Goss (1896).
Université de Purdue (États-Unis).

	1	2	3	4
Longueur des tubes	3,50 m.	3,50 m.	3,50 m.	3,50 m.
Tirage en millimètres d'eau dans la boîte à fumée	56 mm.	63 mm.	83 mm.	150 mm.[2]
Charbon brûlé par heure et par mètre carré de grille (Pas de voûte en briques.)	283 kg.	399 kg.	585 kg.	1138 kg.

Nous avons vu précédemment que la voûte en briques ou le bouilleur Ten Brinck avaient pour effet, à tirage égal, de réduire l'activité de la combustion; on peut supposer à priori qu'il en est de même de l'allongement des tubes en raison de l'accroissement de résistance qu'il occasionne. C'est ce que vérifie l'expérience, comme on peut s'en rendre compte par l'examen des

[1] Les essais de M. Kennedy n'ont malheureusement été effectués qu'à une allure très réduite.
[2] Ces dépressions paraissent faibles, pour l'activité de combustion obtenue; mais nous les donnons d'après le rapport de M. Goss.

tableaux précédents donnant les résultats des essais de la *Compagnie de Lyon*, dans lesquels on a fait varier la longueur des tubes. L'activité de la combustion croît au fur et à mesure que la longueur des tubes diminue; l'augmentation varie de 11 à 19 0/0 quand on passe des tubes de 5 m. aux tubes de 3 m. Cette augmentation est d'autant moins accusée que les tirages sont plus forts.

En service courant, la dépression en marche dans la boîte à fumée est très variable; elle dépend du travail produit par la machine, de la surface de grille, de la nature du combustible, du mode de chauffe adopté, de l'état du feu, de la position de la tuyère d'échappement par rapport aux tubes, de la section du calorimètre, de l'encrassement plus ou moins grand des tubes. Quand l'échappement est serré, elle peut s'élever jusqu'à 190 m/m. en hauteur d'eau; normalement, on peut considérer, en France, qu'elle varie entre 45 et 90 m/m. En Angleterre, où les machines sont plus poussées, elles fonctionnent avec des dépressions normales de 80 à 120 m/m.; aux États-Unis, où elles sont plus poussées encore, on atteint fréquemment, en service courant, des dépressions de 150 à 160 m/m.

Le tableau ci-après donne les résultats qui ont été obtenus au cours d'essais effectués par la *Compagnie de l'Est* sur la machine 807, à grande vitesse. Les dépressions très élevées constatées avec l'échappement serré à fond ne doivent pas être considérées comme correspondant aux conditions du service courant.

ADMISSION AUX CYLINDRES		VIDE EXPRIMÉ EN MILLIMÈTRES DE HAUTEUR D'EAU							
Crans de marche indiqués sur la réglette de distribution.	Admission en centièmes de la course.	En haut et dans l'axe de la plaque tubulaire, dans l'axe d'un tube de la 2e rangée.				En bas et dans l'axe de la plaque tubulaire, dans l'axe d'un tube de la 4e rangée.			
		Tuyère ouverte en grand S = 0,0271 m².		Tuyère étranglée au maximum S' = 0,0058 m²		Tuyère ouverte S = 0,0271 m².		Tuyère étranglée S' = 0,0058 m².	
		Aussitôt après démarrage	Après 30 kilom.	Aussitôt après démarrage	Après 30 kilom.	Aussitôt après démarrage	Après 30 kilom.	Aussitôt après démarrage	Après 30 kllom.
Point mort.	11,4	36	55	100	140	33	55	88	127
Cran n° 1. .	13,7	58	75	128	160	58	71	132	160
— n° 2. .	18,2	72	89	166	173	65	84	165	167
— n° 3. .	29,0	96	98	188	189	88	91	180	180

Influence de la réduction de la surface de grille sur la quantité de charbon brûlée par heure. — Les expériences de la *Compagnie de Lyon* ont montré que la quantité de combustible brûlée par heure décroît dans une propor-

tion sensiblement moins forte que la surface de grille, soit en moyenne de :

9,25 0/0	quand on réduit la grille de	1/4		
32 —	—	1/2	avec tirage de	25 mm.
27,5 —	—		—	45 —
26 —	—		—	75 —

Les résultats sont les mêmes, que le foyer comporte ou non une voûte ou un bouilleur Ten Brinck.

On peut mettre ces résultats sous une autre forme donnant l'augmentation de la quantité de combustible brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille ; elle est en moyenne de :

21 0/0	quand on réduit la grille de	1/4		
36 —	—	1/2	avec le tirage de	25 mm.
45 —	—		—	45 —
50 —	—		—	75 —

Il résulte de ces mêmes expériences que la production de vapeur se trouve diminuée par les réductions de la grille à peu près dans les mêmes proportions que la quantité totale de charbon brûlée.

Ces chiffres indiquent que les petites grilles produisent relativement plus que les grandes à tirage égal, ce qui est parfaitement conforme aux indications de la pratique.

79. Influences de l'activité de la combustion sur le rendement du combustible. — Clark, dans son ouvrage resté classique [1], posait en principe, il y a une quarantaine d'années, que le rendement des foyers s'élevait avec l'activité de la combustion et que l'on avait tout avantage à réduire la surface de grille au minimum admissible en pratique.

Nous ne reproduirons pas ses arguments, surtout basés sur la meilleure utilisation de combustible due à l'élévation de la température.

Cette théorie n'est plus guère admise aujourd'hui où l'on s'accorde généralement à reconnaître que le rendement, tant de l'appareil de combustion que de l'appareil d'échange de chaleur, diminue lorsque l'on augmente l'activité de la combustion, surtout au delà d'une certaine limite pourtant fréquemment atteinte dans la pratique courante surtout en Angleterre et aux États-Unis.

Une combustion trop active diminue l'utilisation pour les raisons suivantes :

1° La combustion s'effectue incomplètement et des fragments de combustible imparfaitement brûlés sont entraînés avec la boîte à fumée et la cheminée; d'où perte dans le rendement du combustible ;

2° Les produits de la combustion, portés à une température plus élevée, sont animés d'une vitesse trop grande pour qu'ils puissent se refroidir suffisamment dans le faisceau tubulaire et ils emportent au dehors une quantité

[1] *Railway Machinery.*

de calorique plus considérable; d'où perte dans le rendement de la chaudière;

3° La contrepression de la vapeur devant les pistons, nécessaire pour assurer le tirage, peut devenir trop grande; d'où perte dans le rendement de la machine;

4° La température du feu étant plus élevée, les foyers sont plus rapidement détruits; d'où perte dans l'utilisation financière de la locomotive.

Cette limite est plus ou moins reculée, suivant la nature du combustible, le type du foyer et le mode de chauffe adoptés. Elle est la plus élevée avec les charbons de bonne qualité, demi-gras, brûlés en couche épaisse dans des foyers profonds et atteint son minimum avec les houilles menues et maigres brûlées en couche mince dans des foyers peu profonds.

Nous nous occuperons plus tard des pertes qu'entraîne pour la vaporisation un tirage trop énergique et nous nous contenterons pour le moment d'envisager celles qui se produisent dans l'appareil de combustion. Il existe d'ailleurs entre ces deux pertes cette différence considérable que la première subsiste, le diamètre du corps cylindrique et la section de passage des tubes restant les mêmes, si l'on augmente la surface de grille, tandis que la seconde ne dépend que de l'intensité de la combustion, c'est-à-dire de la quantité de charbon brûlée par unité de temps et de surface de grille.

La combustion est une opération qui, si rapide qu'elle soit, n'est pas absolument instantanée; on peut craindre qu'elle ne s'effectue pas intégralement si le temps qui lui est alloué pour se produire est insuffisant. L'air traverse trop rapidement la couche de combustible quand la combustion est très active, et les gaz incomplètement brûlés pénètrent trop vite dans les tubes où ils s'éteignent.

Enfin, si l'on doit admettre la nouvelle théorie de la combustion, il se formerait une plus grande quantité d'oxyde de carbone lorsque, la combustion étant très active, la température du foyer augmente.

La quantité d'escarbilles entraînée, variable suivant la nature du combustible, est à peu près proportionnelle à l'intensité du tirage comme le prouve le tableau ci-dessous donnant quelques-uns des résultats relevés au cours des expériences de la *Compagnie de Lyon*.

TIRAGES DE	LONGUEUR DES TUBES	FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			TEN BRINCK		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
Quantité d'escarbilles en kilogrammes pour 1 000 kilogrammes de combustible brut brûlé.	7	24,5	35,0	55,0	10,8	18,8	24,3	»	»	»	10,6	16,3	28,8
	6	17,4	27,9	47,2	5,0	15,9	21,0	9,3	13,8	29,1	5,9	15,9	29,0
	5	14,6	17,7	47,6	6,6	14,6	18,4	7,1	14,8	26,2	10,3	17,3	31,0
	4,50	7,7	26,2	43,3	5,2	10,3	32,1	7,4	15,5	31,0	8,9	18,6	41,0
	4	14,7	22,5	51,2	4,3	10,3	14,7	7,9	16,5	29,7	9,3	19,6	27,7
	3,50	11,4	29,5	47,8	6,5	14,9	24,9	5,1	16,1	27,1	9,9	18,3	32,9
	3	10,9	27,2	41,5	7,3	14,3	20,0	7,6	12,4	28,1	6,7	15,4	28,7

Les expériences effectuées à l'Université de Purdue ont mis le même fait en lumière.

	1	2	3	4
Quantité de charbon brûlée par mètre carré de grille et par heure. . . . . kilogrammes.	283	399	585	1 138
Poids total d'escarbilles recueillies par heure dans la boîte à fumée. . . . . kilogrammes.	29	42,7	58,5	79,2
Perte due à l'entraînement des escarbilles. P. 100.	4,3	7,2	10,2	15,5

On voit que la perte due à cette seule cause peut s'élever à 10 0/0 pour une allure de la chauffe qui ne dépasse pas une valeur pratique. La voûte en briques réduit de 40 à 50 0/0 l'entraînement des escarbilles.

Les expériences de la *Compagnie de Lyon* ont donné les résultats, consignés dans le tableau ci-dessous, qui montrent que, avec le foyer ordinaire, la combustion devient moins parfaite à mesure que le tirage augmente et que l'influence du tirage est très réduite sous ce rapport par la voûte en briques et le bouilleur Ten Brinck.

Les expériences de Purdue, effectuées sur une locomotive à foyer profond non muni d'une voûte, ont particulièrement mis en lumière la diminution de rendement du foyer à mesure que l'intensité de la combustion s'accroît. Dans ces essais, pour séparer les utilisations des appareils de combustion et d'échange de chaleur, on a simplement fait varier la surface de grille d'une chaudière locomotive donnée, en réduisant successivement sa surface à l'aide de briques. On peut admettre à la rigueur que le rendement de la chaudière proprement dit variait très peu avec l'intensité de la combustion, la même quantité totale de charbon étant brûlée dans le foyer au cours des diverses expériences. La variation des chiffres de vaporisation ainsi obtenus peut donc être, par exception, considérée comme représentant celle de l'utilisation du combustible seul. Les résultats obtenus sont résumés ci-dessous :

	1	2	3	4
Poids de charbon brûlé par heure et par mètre carré de grille . . . . . kilogrammes.	283	399	585	1 138
Poids d'eau vaporisé par kilogramme de charbon brûlé. . . . . kilogrammes.	6,94	6,60	6,30	5,58
Perte de rendement par rapport à l'expérience n° 1. . . . . P. 100.	-	4,7	9,0	19,2

La perte résultant d'un tirage très violent est en réalité assez faible, on le voit, même pour une activité de combustion atteignant le chiffre très exceptionnel de 1138 kg. par mètre carré et par heure. Si le foyer avait été muni

d'une voûte en briques, la perte eût été beaucoup moins grande. Nous verrons que la perte due à la réduction du rendement de l'appareil d'échange de chaleur, quand on accroît le tirage, est beaucoup plus grande.

Une intensité déterminée de la combustion correspond, pour toute machine donnée, à l'économie maximum, aussi est-ce moins l'activité de cette combustion que la *surface de grille* qui devraient varier avec le travail; cette condition est malheureusement d'une réalisation impossible dans la pratique. On doit se contenter de déterminer la surface de grille en vue de la production facile du travail moyen et de la possibilité de produire le travail maximum sans admettre une activité excessive du feu.

Il est évident que, plus les circonstances nécessitant que la machine développe son maximum de puissance se présenteront rarement, et moins on pourra baser sur ce travail maximum la détermination de la surface de grille. Il vaudra mieux, en pareil cas, limiter les dimensions du foyer, quitte à forcer un peu le feu au delà de ce qui est économique, dans les courts instants où il devient nécessaire d'augmenter la production.

Il y a, comme nous l'indiquerons à propos de la détermination des proportions des chaudières, un juste milieu à garder pour assurer un fonctionnement économique sans sacrifier la question de poids. Toutefois, on aura toujours avantage, tant au point de vue de la puissance qu'en ce qui concerne le fonctionnement économique et la conduite facile, à employer des grilles largement proportionnées mais sans exagération.

80. Choix du combustible. — Le combustible le plus avantageux n'est pas nécessairement le moins cher, mais celui qui réunit toutes les conditions susceptibles d'abaisser autant que possible la dépense totale, les frais de premier établissement et d'entretien, en même temps qu'il permet d'assurer le service. En effet, un combustible de bas prix peut avoir une assez faible puissance calorifique, être assez léger sur la grille et par conséquent donner lieu à des entraînements assez importants dans la boîte à fumée, pour créer un excédent de consommation compensant et au delà la diminution du prix de l'unité. En outre, le charbon pour locomotives doit satisfaire à des conditions déterminées; il serait peu rationnel de sacrifier les qualités de légèreté, de compacité et de puissance de ces machines, pour utiliser des combustibles inférieurs, à moins d'un abaissement du prix de ce combustible dans une proportion qui ne paraît laisser place à aucun doute, comme c'est le cas en Belgique et dans certaines régions des États-Unis. Le combustible destiné aux locomotives doit se prêter à une combustion des plus actives sans encrasser les grilles d'une manière exagérée ni donner lieu à des entraînements importants dans la boîte à fumée. Telle locomotive, chauffée avec du gros charbon de bonne qualité en gros morceaux ou de la briquette, pourra

développer beaucoup plus de puissance que si l'on emploie du tout-venant médiocre ou surtout des menus. On pourra donc, à service égal, employer, avec un bon combustible, des machines plus légères et moins coûteuses de premier achat. Il y a là, on le voit, un problème assez complexe dont la solution variable suivant les circonstances, est surtout indiquée par l'expérience et la pratique. Il a fait et fait encore l'objet d'une étude attentive des administrations de chemins de fer.

En ce qui concerne les trains express, l'économie de combustible peut devenir secondaire en face des nécessités du service, et il en sera de plus en plus ainsi, à mesure que les vitesses et les poids des trains augmenteront. La qualité maîtresse des locomotives à grande vitesse étant, nous le verrons, le faible poids par unité de puissance, l'emploi d'un *combustible de bonne qualité* constitue en somme le *procédé le plus efficace pour accroître la puissance des locomotives sans augmenter leur poids*, et cela bien moins parce que la puissance calorifique de ce charbon est plus grande que grâce à ce qu'il permet une combustion beaucoup plus active. Les charbons menus sont entraînés dans une grande proportion dès que l'on veut brûler plus de 350 à 400 kg par mètre carré de surface de grille et par heure, tandis que l'emploi de la briquette en gros morceaux et surtout du charbon demi-gras en roche permet de pousser la combustion jusqu'à 700 ou 800 kg.

Il ne serait pas très étonnant que, dans l'avenir, l'emploi de combustibles de choix ne vienne à s'imposer pour le service des trains à grande vitesse comme pour les torpilleurs, sur lesquels il est une nécessité.

81. Emploi des divers combustibles. — La chaudière locomotive se prête à l'emploi des combustibles les plus divers; dans l'immense majorité des cas, elle est chauffée à la houille, se présentant elle-même sous des formes très différentes; dans quelques pays, on utilise d'autres combustibles comme le lignite en Autriche, ou le bois dans certaines régions de la Russie et de l'Amérique, particulièrement à la traversée des Montagnes Rocheuses; en Russie on a, dans ces dernières années, développé l'emploi du pétrole.

Nous verrons quelles sont les modifications que le foyer des locomotives a dû subir pour se prêter à l'utilisation des combustibles spéciaux; il nous suffira pour le moment, de donner une idée générale des principaux combustibles, purs ou à l'état de mélange, que l'on brûle dans les locomotives.

Nous rappellerons que, au point de vue de la qualité, les charbons se divisent d'une manière générale en :

Houille sèche à longue flamme;	Houille demi-grasse;
Houille grasse à longue flamme;	Houille maigre à courte flamme;
Houille grasse maréchale;	Anthracite.

Les *houilles grasses* se boursoufflent au feu et subissent une sorte de fusion pâteuse qui les fait coller sur la grille; elles donnent en général beaucoup de fumée.

Les *houilles maigres* ne se boursoufflent pas et on peut les brûler sur de fortes épaisseurs. Contrairement aux houilles grasses, on doit éviter de les manipuler beaucoup sur la grille, ce qui ferait perdre du menu par le cendrier.

Les *houilles intermédiaires* se rapprochent plus ou moins des types précédents suivant leur composition.

Les *houilles sèches à longue flamme* s'allument facilement et donnent une flamme claire avec beaucoup de fumée; elles ont peu de tenue au feu.

La combustion des *anthracites* se fait difficilement, parce qu'ils contiennent peu de matières volatiles; elle s'opère lentement avec une flamme bleue très courte. Les fragments décrépitent parfois au feu et les débris passent par les vides de la grille.

Les *lignites* servent de transition entre le bois et la houille; ils renferment une grande proportion de matières volatiles (jusqu'à 45 0/0) et souvent de cendres; leur puissance calorifique n'est guère supérieure à la moitié de celle de la bonne houille. Il existe cependant une qualité supérieure dite *lignite parfait* qui est comparable aux houilles de qualité ordinaire.

Dans le commerce, les houilles se classent d'après les provenances et la grosseur des morceaux. A ce dernier point de vue on distingue ordinairement : le *gros*, la *gailleterie* et le *tout-venant*.

Le gros est formé, ainsi que son nom l'indique, de gros morceaux qui ont un volume de plusieurs décimètres cubes. On le sépare à la main au moment de l'arrivée au jour. Il a toujours une valeur supérieure à celle de la gailleterie, son emploi ne présente pourtant pas d'avantages parce qu'on est obligé, pour le brûler, de le casser en morceaux, ce qui fait du déchet.

La gailleterie se compose de morceaux de houille qui n'ont pas pu passer à travers une grille dont les barreaux sont espacés de 3 à 5 centimètres.

Le menu est le charbon qui a passé à travers les grilles; c'est ce qui reste quand on a retiré du charbon sortant de la mine le gros et la gailleterie. Il a une valeur très inférieure à celle de la gailleterie. On se préoccupe beaucoup, dans les houillères, de diminuer la proportion de cendres et on fait pour cela, sur le carreau des mines, des lavages, des criblages qui arrivent à abaisser cette proportion à 5 0/0 et au-dessous.

On fait dans certaines mines des catégories plus nombreuses en faisant passer le charbon à travers des cribles dont les intervalles sont de plus en plus étroits. C'est ainsi qu'on a, au-dessus de la gailleterie, la gaillette; au-dessous le gailletin, puis successivement les noisettes, les têtes de moineaux, les fines grenues, et enfin les fines poussier qui vont en décroissant de grosseur.

Enfin une autre catégorie de charbon est le tout-venant qui, d'après son nom, devrait être le charbon tel qu'il est extrait de la mine; mais souvent le tout-venant commercial est un mélange de gailleterie et de menu en proportion que l'on fait varier à volonté; le prix dépend de ces proportions. Le tout-venant renfermant 30 à 35 0/0 de gailleterie est particulièrement propre au chauffage des chaudières à vapeur.

La houille pèse : en gailleterie, de 75 à 80 kilos l'hectolitre; en tout-venant, un peu plus de 80 à 85 et même jusqu'à 100 kg.

La proportion des vides entre les morceaux, pour le passage de l'air, est, pour la gailleterie, de 40 à 45 0/0; pour le tout-venant, les vides varient de 25 0/0 à 35 0/0.

Dans les chemins de fer, on emploie généralement les charbons à l'état de mélanges permettant d'obtenir, au meilleur compte, les compositions les plus favorables au service des locomotives et que souvent les houilles pures ne donneraient pas.

Les briquettes, employées sur le Continent européen, sont formées de houilles menues, agglutinées avec du brai et comprimées dans des moules. Leur valeur dépend évidemment de celle des houilles entrant dans leur composition; cependant l'agglomération qu'elle ont subie permet de leur incorporer des menus qui seraient autrement peu utilisables sur les grilles ordinaires; aussi forment-elles généralement un bon combustible comparable à la grosse houille de bonne qualité.

On trouvera ci-dessous un état résumé des différents combustibles et des mélanges employés par quelques-unes des grandes administrations de chemins de fer, françaises et étrangères[1].

Chemin de fer du Nord. — Le combustible employé aujourd'hui est constitué pour la plus grande partie de fines auxquelles on adjoint du tout-venant et des briquettes. Les briquettes servent à l'allumage, à la mise en pression et dans des cas particuliers où l'on doit relever ou pousser le feu. On en brûle annuellement une quantité à peu près constante et égale à 12 0/0 de la consommation totale. La houille constitue le combustible ordinaire des locomotives. Elle est employée sous forme de mélange composé d'un quart tout-venant (à 30 0/0 de gailleteries), 3/4 de fines ou menus, criblés sur barreaux longs espacés de 1 à 4 centimètres. Un tiers du poids des fines est formé de fines à 1 centimètre et les deux tiers de fines à 4 centimètres. Pour les machines à grande vitesse, la composition précédente est un peu modifiée et dans les dépôts principaux on constitue pour les machines des approvisionnements dans lesquels la proportion de tout-

[1] Voir le rapport de M. Hodeige, *Bulletin de la Commission internationale du Congrès des Chemins de fer*, numéro de juillet 1895.

venant est augmentée et portée à 50 0/0 au lieu de 25 0/0; les fines y entrent donc pour 50 0/0 au lieu de 75 0/0. Au point de vue de la nature, le combustible des locomotives est formé de 40 0/0 de charbon très gailleteux, 25 0/0 de charbon pour coke, 25 0/0 de charbon demi-gras et 10 0/0 de charbon maigre, soit environ deux tiers de charbon gras et gazeux sous forme tout-venant et de fines, provenant surtout des mines du Pas-de-Calais et contenant 20 à 35 0/0 de matières volatiles; le reste, soit un tiers, est du charbon demi-gras et maigre sous forme de fines provenant surtout des mines du Nord et de Belgique et renfermant de 11 à 18 0/0 de matières volatiles.

Les charbons des diverses provenances sont mélangés de manière à constituer un combustible contenant environ 25 0/0 de matières volatiles.

La hauteur du feu sur la grille est de 30 à 40 centimètres à l'arrière et 15 à 20 centimètres à l'avant.

Chemins de fer de l'Est. — Principalement du charbon menu, ou mieux poussier. On délivre aux locomotives des poussiers avec une certaine proportion (10 à 30 0/0 suivant le service, 18 0/0 en moyenne) de briquettes ou de houille en morceaux. Ces briquettes ou morceaux sont employés pour les allumages et pour les coups de collier.

La couche de combustible est généralement un peu plus forte à l'arrière qu'à l'avant.

Elle est: pour les trains ordinaires, de 20 à 30 centimètres à l'arrière, de 15 à 20 centimètres à l'avant. Pour les trains chargés, elle atteint dans les machines à foyer profond 40 à 50 centimètres et même parfois 60 centimètres à l'arrière, et 20 à 30 centimètres à l'avant.

Chemins de fer de Paris à Orléans. — Charbons gras, tout-venant menus et briquettes. Ces combustibles sont délivrés aux mécaniciens en proportions variables suivant la nature du service des machines (express, voyageurs, marchandises et manœuvres de gare); suivant les profils des lignes, suivant la qualité des combustibles qui sont de provenances différentes et, enfin, suivant la situation sur le réseau des divers dépôts de locomotives.

Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée. — Charbons menus et agglomérés dans des proportions variables d'un point à l'autre du réseau (en moyenne 65 0/0 de menus et 35 0/0 d'agglomérés).

Chemin de fer de l'Etat belge. — Suivant le service à mesurer, on fait usage de charbon menu demi-gras ou d'un mélange de charbon menu gras et de charbon menu maigre.

Grande-Bretagne. — On brûle en général des houilles de très bonne qualité donnant une vaporisation de 8 à 9 kg; la meilleure est celle du

pays de Galles que l'on mélange parfois avec 1/3 de *hard coal*. La houille du Derbyshire est presque aussi estimée ; on l'emploie sur les réseaux du Centre, particulièrement sur le *Midland*. Les lignes de la côte Est, comme le *North Eastern*, font usage de houille de Newcastle. Les lignes écossaisse brûlent en général du charbon de pays, inférieur aux houilles anglaises.

On charge ordinairement le charbon, sur des tenders, tel qu'il vient de la houillère.

Autriche-Hongrie. — On brûle de la houille (vaporisation 7 kg.), une qualité spéciale d'anthracite (vaporisation 4,5 à 5 kg.) et des lignites (vaporisation 3 à 4 kg.).

Russie. — On brûle, sur les chemins de fer de l'*Etat*, du bois (vaporisation 3 à 3,5 kg.), du charbon menu (vaporisation 6 à 8 kg.) ou des résidus de pétrole (vaporisation 10 à 13 kg.). Sur les lignes du *Vladicaucase*, on emploie exclusivement le pétrole depuis 1894. Sur le réseau de *Varsovie-Vienne*, on brûle de la houille de pays, assez médiocre (vaporisation 6 kg.).

Etats-Unis. — On brûle des espèces très variables de charbon, depuis les plus gras jusqu'aux plus maigres. En Pennsylvanie, on brûle beaucoup d'anthracite dans des foyers spéciaux à grande grille (Wotten).

L'anthracite de Pennsylvanie est un charbon extrêmement maigre composé de carbone presque pur mélangé parfois dans la mine à une notable proportion de pierres dont il faut le séparer par une préparation mécanique, d'un beau noir et ne tachant pas le papier, qui brûle sans fumée et presque sans flamme. Il crépite au feu et se brise en menus fragments passant à travers les grilles ordinaires. Sa puissance calorifique est d'environ 8 500 calories.

On ne brûle plus de bois que sur quelques lignes du Far-West, dans les districts montagneux (*Southern Pacific*).

Dans quelques régions de l'Ouest on brûle des lignites contenant 40 à 45 0/0 de matières volatiles (*Union Pacific*).

L'emploi du pétrole, malgré l'abondance de ce combustible en Pennsylvanie), ne s'est pas encore répandu.

82. Emploi des combustibles liquides. — Le combustible liquide présente en principe de nombreux et importants avantages. Il est d'un chargement et d'un arrimage faciles ; il ne fait pas de poussière ; il permet une précision parfaite dans le réglage du feu, son alimentation continue et automatique fournit la possibilité de donner des coups de collier ou d'arrêter au contraire instantanément la production de la chaudière dès que la dépense est supprimée ; il ne fait pas de fumée, ne donne ni escarbilles, ni étincelles, n'en-

crasse pas les grilles ou les tubes ; il ne demande pas autant d'expérience professionnelle, pour la conduite du feu, que les combustibles solides. Ajoutons que les qualités connues de combustibles liquides possèdent une puissance calorifique supérieure de 30 à 40 0/0 à celle des bonnes houilles, ce qui permet de diminuer le poids des approvisionnements contenus dans le tender et d'obtenir, d'un foyer de capacité donnée, une production proportionnellement plus grande de vapeur.

Pour compenser ces avantages, les combustibles dont nous nous occupons n'ont en réalité qu'un seul inconvénient très sérieux, leur prix, dans nos régions du moins. Ils sont d'une manipulation un peu dangereuse il est vrai, mais avec du soin et de l'attention cet inconvénient pourrait et peut être surmonté. Ils sont assez difficiles à brûler et nécessitent des installations spéciales, mais il existe aujourd'hui des appareils spéciaux permettant d'effectuer cette combustion dans de bonnes conditions et d'assurer la marche régulière du feu. Leur prix, résultat de bien des causes et qui, les facilités de transport vinssent-elles à augmenter, ne diminuerait pas sans doute dans une grande proportion, la demande devant rester bien au-dessus de la production, paraît donc pour le moment le seul obstacle à leur emploi. D'ailleurs, ce qui tend à le prouver c'est que, dans les pays de production de ces combustibles, particulièrement en Russie, ils sont employés sur une échelle considérable.

Les seuls combustibles liquides qui soient industriellement utilisables sont les pétroles dont les principaux gisements se trouvent dans le Caucase et en Pennsylvanie. On n'utilise, dans les foyers, que le résidu (*astatki* ou *mazout*) de la distillation des essences, des huiles lampantes ou de graissage. Le mazout, d'aspect goudronneux, noirâtre, a une densité de 0,910 environ, il représente environ la moitié du pétrole brut privé de ses essences et de la kérosène ; ce mazout contient encore des huiles de graissage que l'on peut séparer par distillation. Le résidu de cette nouvelle distillation est plus épais et plus foncé que le mazout, mais il coûte moins cher.

Les résidus de distillation que l'on emploie pour le chauffage des chaudières ont une puissance calorifique qui n'est pas tout à fait double de celle de la houille (mazout : puissance calorifique environ 11000 calories); on admet, dans la pratique, que la combustion d'un kilogramme de ces huiles peut produire la vaporisation de 11,5 à 12 kg. d'eau (exceptionnellement 13 kg.) dans des conditions moyennes où le même poids de bon charbon en vaporiserait de 8 à 9 kg.

Ce combustible ne peut se brûler que dans un état extrême de division et en contact très intime avec l'air; on réalise cette condition avec des appareils analogues aux éjecteurs. Un jet de vapeur entraîne et pulvérise l'huile, produisant en même temps un violent appel d'air qui se mêle directement et

intimement aux fines gouttelettes du liquide. La proportion de vapeur et d'huile doit varier entre d'assez étroites limites; si le combustible est en excès il est insuffisamment pulvérisé, brûle mal et donne une fumée noire et abondante; un excès de vapeur entraîne une perte inutile.

On a inventé un grand nombre d'appareils propres à assurer la combus-

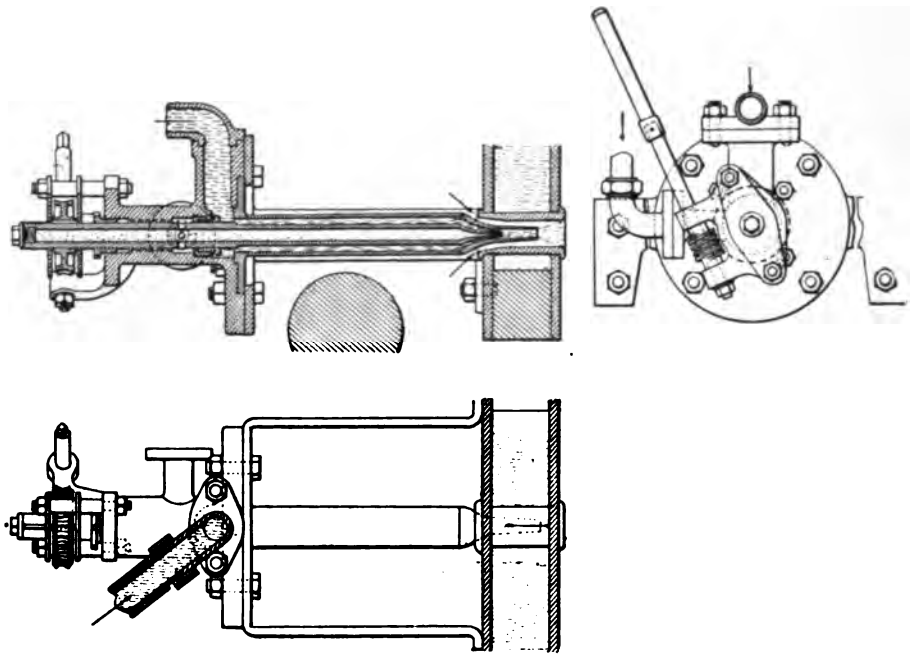


Fig. 260. — Brûleur à pétrole système *Urquhart.*

tion des huiles de pétrole dans les foyers; le plus connu en France est celui de M. d'Allest qui l'a appliqué, à titre d'essai, au chauffage des chaudières marines et surtout des torpilleurs. Nous ne citerons, de ces appareils, que ceux qui ont été appliqués aux locomotives.

On emploie en Russie les appareils suivants qui se rattachent à deux catégories [1] :

Pulvérisateur *Urquhart* (fig. 260).
— du chemin de fer *Rjäsan Oural* (fig. 261).
— annulaire système *Brandt* (fig. 262).
— système *Karapetow.*
— des *Chemins de fer baltiques.*
— système *Bjelikow.*

[1] Nous sommes redevables d'une grande partie des renseignements qui suivent et des figures relatives aux pulvérisateurs russes à M. Eugène Brückmann : *Naphthaheizung der Locomotivkessel in Russland* (*Zeitschrift des Vereines der Deutscher Ingenieure*, 21 novembre 1896).

1re *catégorie.* Système *Bjelikow, Urquhart, Rjäsan Oural,* des *Chemins de fer baltiques.*

Dans ces appareils la vapeur est amenée par une tuyère centrale de l'in-

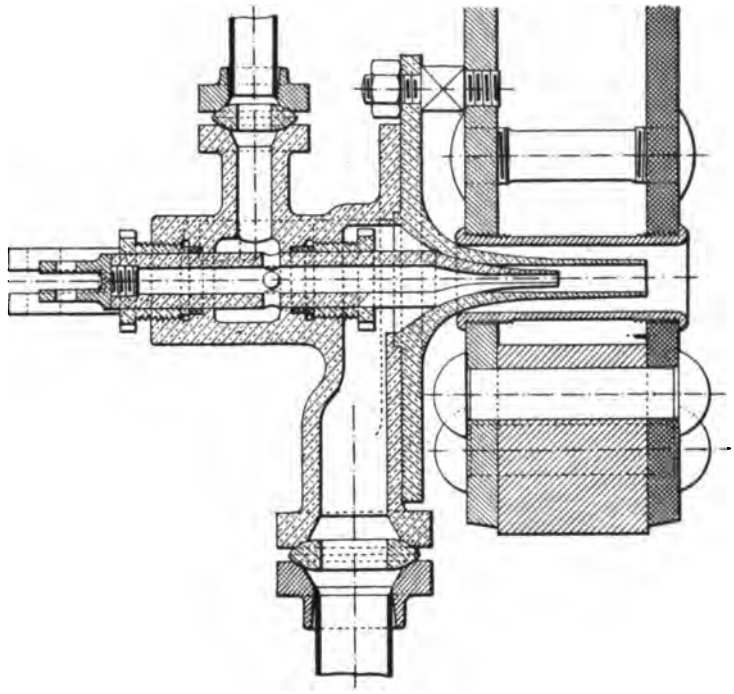


Fig. 261. — Brûleur à pétrole, système *Urquhart* (*Chemin de fer Rjäsan-Oural*).

jecteur à pétrole, dont la position est réglable à la main ; le naphte et la vapeur sont donc mélangés avant de sortir de l'injecteur.

2e *catégorie.* Système *Karapetow*, système *Brandt.*

Les jets de naphte et de vapeur font un angle de 60 à 80° et ne se mélangent qu'après la sortie de l'injecteur. L'appareil Karapetow est muni d'un canal spécial d'arrivée d'air ; M. Urquhart, ayant fait des expériences sur les canaux d'arrivée d'air dans les injecteurs, a abandonné ce dispositif qui donne peu d'avantages et qui a l'inconvénient de produire un bruit très désagréable.

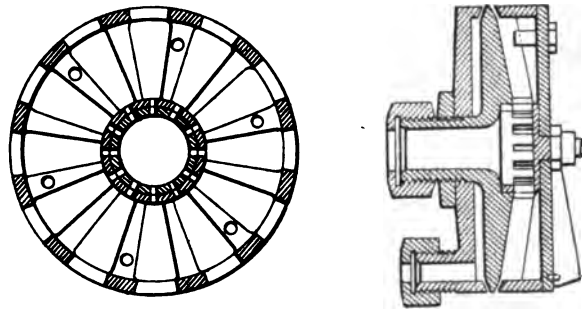


Fig. 262. — Brûleur *Brandt.*

La flamme du pétrole projeté par les éjecteurs est très chaude et attaquerait rapidement les parois du foyer si on ne les protégait par des revêtements

en briques réfractaires qui ont en outre l'avantage, par leur masse portée au rouge, de fournir un élément régulateur au foyer et remplacent le combustible incandescent.

M. Urquhart (*Grasi Tzaritzin*) a le premier fait d'importantes expériences sur les revêtements. Il s'était arrêté à deux types très semblables dont l'un est représenté (fig. 263).

Dans les machines à trois essieux dont le foyer est très court on a installé

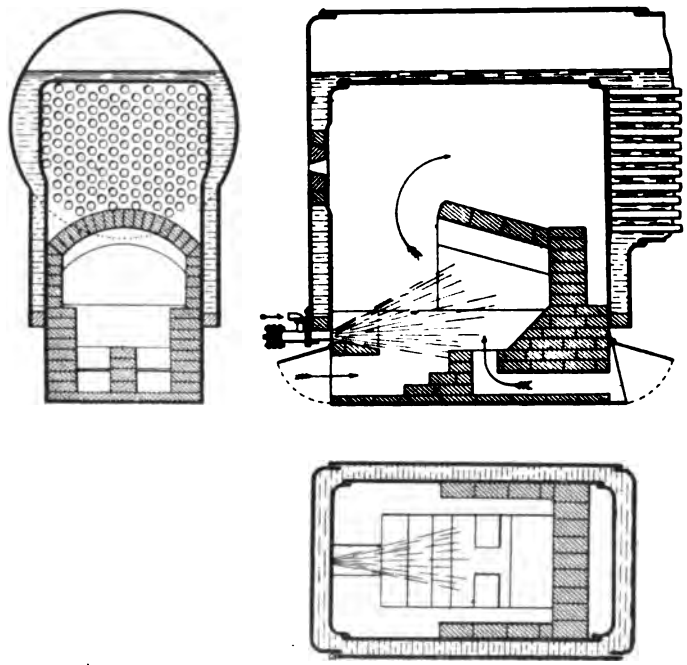


Fig. 263. — Disposition *Urquhart*.

un écran en briques (vis-à-vis de l'injecteur) pour briser le jet de naphte et de la vapeur et rendre le mélange du naphte de la vapeur et de l'air plus intime.

Sur la ligne *Grasi Tzaritzin* on a muni 40 locomotives de chaudières système *Verderber* avec revêtements en briques de deux types. Avec la voûte supérieure les résultats furent mauvais ; la voûte se perçait et se détruisait rapidement, ce qui permettait aux gaz d'attaquer les tôles du foyer. Plus tard, on a protégé le ciel de foyer par une couche d'eau et on a reporté la voûte vers le bas du foyer ; ce type a été abandonné.

Le *jet de pétrole* doit être aussi vertical que possible, rencontrer une paroi réfractaire portée au rouge, puis rebondir et se mélanger avec l'air qui pénètre par des canaux latéraux ou inférieurs ; les *gaz chauds* doivent être ramenés en arrière par une voûte en maçonnerie avant de se diriger vers les tubes. Dans les foyers courts les revêtements en gradins donnent de bons résultats.

On emmagasine le pétrole sur le tender dans des réservoirs en fer à cheval ou quadrangulaires. Les figures 264 et 265 montrent un exemple de chaque dispositif employé par M. Urquhart. Le naphte est réchauffé en hiver au moyen d'un serpentin qui entoure la crépine d'aspiration et qui est alimenté

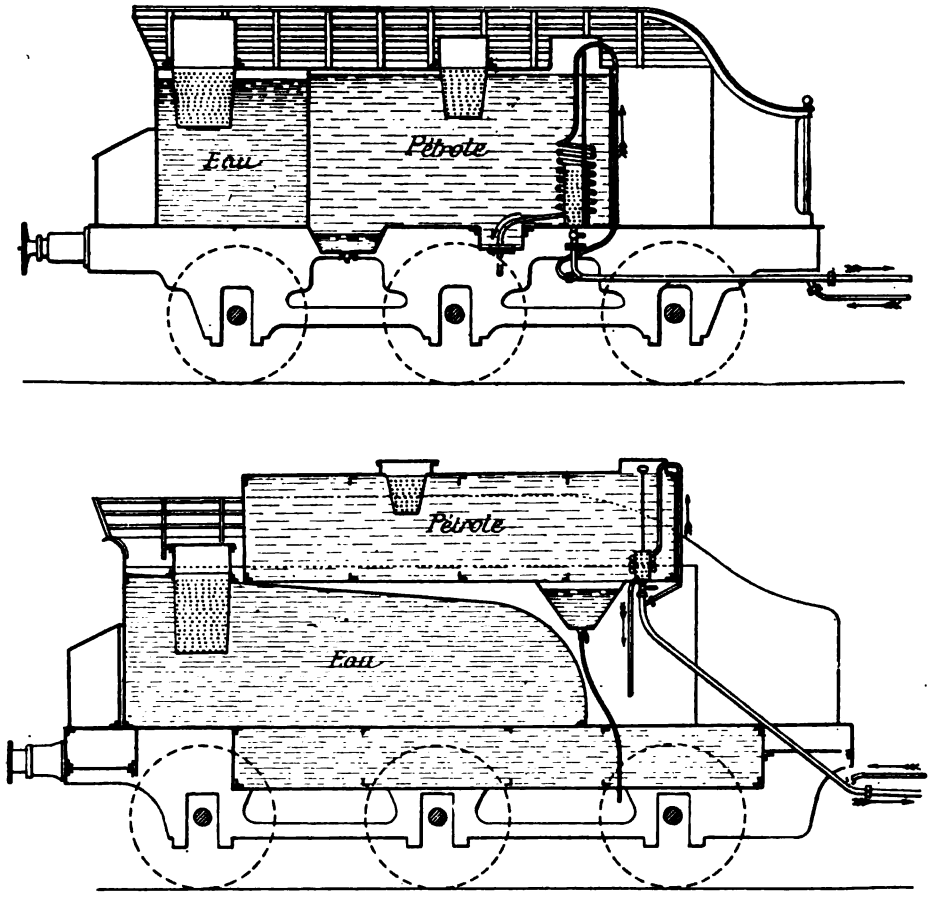


Fig. 264 et 265. — Tenders russes disposés pour le chauffage des machines au pétrole.

par la vapeur de la chaudière. Il existe une poche de vidange pour réunir les impuretés que contiennent les résidus de pétrole et l'eau de condensation.

Le prix de transformation d'un tender ordinaire en tender spécial pour le pétrole coûte, d'après M. Urquhart, de 1 000 à 1 925 fr.

Les Chemins de fer baltiques emploient des réservoirs cylindriques placés au-dessus des caisses à eau.

Le gouvernement russe, désireux de favoriser une industrie nationale, a beaucoup encouragé l'application du pétrole au chauffage des locomotives, particulièrement en soumettant depuis cinq ou six ans les houilles anglaises à des droits d'entrée prohibitifs.

Les chemins de fer russes emploient comme combustibles les résidus de première distillation (mazout ou astaki) encore très impurs, dont le prix est actuellement de : 6,75 fr. à Bakou ; 16,25 fr. à Zastzen sur bateau-citerne (Volga) ; 23 fr. à Nischni Nowgorod ; 41,90 fr. à Tossno (près de Pétersbourg, chemins de fer baltiques). La *houille russe* de bonne qualité (pouvoir calorifique 7 000 cal.) coûtait, en 1895 : 36,90 fr. la tonne dans les environs de Pétersbourg. La *houille anglaise* (Newcastle, qualité supérieure, 8 000 cal.) revenait à 23 fr. dans les ports de la Baltique ou de la mer Noire.

On admet que le pouvoir calorifique du naphte est supérieur de 50 0/0 à celui de la houille de Newcastle. Malgré tout la houille anglaise était encore le combustible le plus économique dans la région de Pétersbourg ; depuis les nouveaux droits d'entrée appliqués aux houilles anglaises, les houilles russes et le naphte restent seuls en présence et l'emploi du naphte donne à Pétersbourg une économie de 33 0/0 ; cette économie augmente à mesure qu'on se rapproche du Caucase.

D'après M. Bruckmann, les avantages que présenterait le chauffage au pétrole, du moins au point de vue russe, pourraient se résumer comme suit :

1° Frais de combustible moins élevés qu'avec le chauffage à la houille russe ; on réalise une économie de 25 à 45 0/0 suivant la distance qui sépare le point de consommation du gisement de pétrole ;

Soient	Parcours annuel d'une machine	35 000 km.
	Vitesse moyenne	35 —
	Prix de revient de la houille.	37,50 fr.

L'économie varie de 2 812 fr. 50 à 5 062 fr. 50 par machine ; la durée moyenne d'un revêtement est de 2 à 3 mois ; en comptant 5 revêtements par an à 157 fr. 25 l'un, on obtient une dépense de 786 fr. 25, ce qui réduit l'économie entre 18 et 38 0/0 ;

2° Allumage et mise en pression rapide. Au dépôt, avec de l'eau froide et en empruntant de la vapeur à une locomotive voisine ou à une chaudière fixe pour faire fonctionner l'injecteur, on compte une 1/2 heure pour porter l'eau à 100° et une heure 1/2 en tout pour obtenir une pression de 12 k. ; avec de l'eau d'alimentation à 70° on a atteint 9 k. de pression en 52 minutes ;

3° Combustion exempte de fumée ; on évite la production de fumée en réduisant l'arrivée du pétrole dès qu'on constate la présence d'un panache de fumée au-dessus de la cheminée ;

4° On peut faire varier facilement et rapidement la pression à la chaudière ;

5° Absence de suie dans les tubes et dans la boîte à fumée ;

6° Le foyer et la tubulure demandent moins d'entretien qu'avec la houille, ce qui tient à l'absence de soufre dans le pétrole. Grâce à la présence du revê-

tement, le refroidissement est lent et uniforme, ce qui est à la fois économique et favorable à la conservation de la chaudière ;

7° Etant donné le pouvoir calorifique considérable des résidus de naphte et la facilité que l'on a de pousser ou de diminuer le feu, on peut franchir des distances plus considérables avec un approvisionnement donné qu'avec le chauffage à la houille.

Signalons. d'autre part, deux inconvénients qu'il est facile d'éviter :

1° Un quart d'heure après avoir éteint le feu, il faut envoyer de la vapeur vive dans le foyer au moyen de l'injecteur en ouvrant en même temps le capuchon de la cheminée et le souffleur pour chasser les gaz détonants qui se forment après la fermeture de l'injecteur. En effet les gouttes de pétrole qui suintent, rencontrant des parois chaudes, se vaporisent et donnent des gaz inflammables qui pourraient faire explosion au moment du rallumage;

2° Il faut éviter l'*emploi de la contre-vapeur* quand on chauffe au pétrole. En effet quand on bat contre-vapeur la pression monte dans la chaudière, la combustion n'est plus régulière et il se produit des explosions partielles; une partie des gaz combustibles s'écoulent dans la boîte à fumée sans être brûlés et sont aspirés dans les cylindres où ils peuvent faire explosion en provoquant leur destruction.

L'emploi exclusif des pétroles est limité aux pays de production de ce combustible; mais son emploi, combiné à celui de la houille et permettant d'obtenir par instants de la chaudière une production intense, est applicable dans tous les pays. Partant de cette idée, M. Holden[1], ingénieur en chef du Great Eastern Ry, désireux surtout d'utiliser les résidus de la fabrication du gaz d'huile servant à l'éclairage des voitures, a breveté des appareils propres à brûler le combustible liquide, et qu'il a appliqués à des foyers ordinaires dont ni la grille ni la voûte en briques ordinaires n'ont subi de modification.

Le pétrole est injecté dans le foyer au-dessus de la couche de charbon par des injecteurs spéciaux (fig. 266 et 267). Un jet de vapeur central aspire le pétrole et le refoule à travers un diffuseur percé de quatre trous qui peut tourner dans un souffleur annulaire formant un injecteur particulier, alimenté de vapeur par un tuyau spécial, lequel détermine un violent courant d'air et de vapeur qui enveloppe la nappe de pétrole et en assurent la combustion parfaite sans production de fumée.

Le foyer de chaque machine porte deux pulvérisateurs. La figure 266 et la légende qui l'accompagnent suffisent, pensons-nous, pour fixer les idées sur l'installation générale de ces appareils sur une locomotive. Dans les machines à tender séparé, le pétrole est emmagasiné dans deux gros réservoirs cylindriques placés en long de part et d'autre au-dessus des caisses à eau.

[1] Voir la *Revue générale des Chemins de fer*, numéro de novembre 1888.

On ne maintient sur la grille qu'un feu en couche très mince, allure que

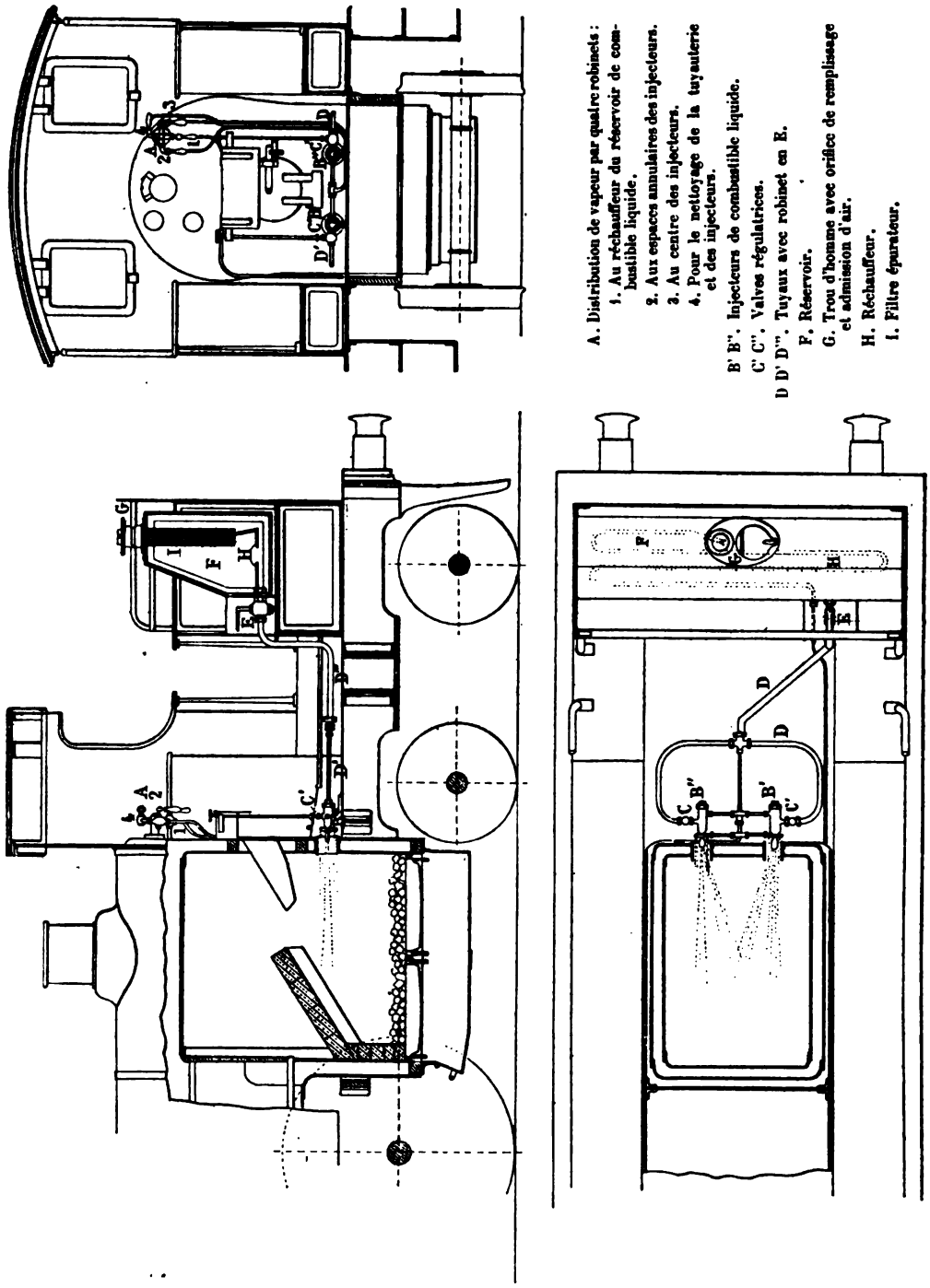


Fig. 266. — Application à une locomotive de l'appareil Holden, pour brûler du pétrole.
(D'après le *Traité de la Machine à Vapeur* de M. E. Sauvage.)

l'on facilite en étendant sur la grille, au départ, des morceaux de chaux. On marche au pétrole avec le cendrier presque fermé et la porte ouverte : l'air

fourni par le souffleur et aspiré au travers des persiennes de la porte suffit à peu près entièrement à la combustion. L'échappement, qui doit être très doux, exige souvent un élargissement des tuyères; c'est ainsi que sur l'une des locomotives expérimentées par M. Holden, ayant des cylindres de 432 mm. de diamètre et 610 mm. de course de piston, il a fallu porter le diamètre de la tuyère d'échappement à 152 mm. et pourvoir la boîte à fumée de clapets de rentrée d'air permettant d'en diminuer le tirage en admettant de l'air au bas de la cheminée. On peut, en outre, afin de se réserver la faculté de marcher à volonté au charbon, remplacer par une manœuvre simple la tuyère spéciale au chauffage mixte par une tuyère d'échappement ordinaire.

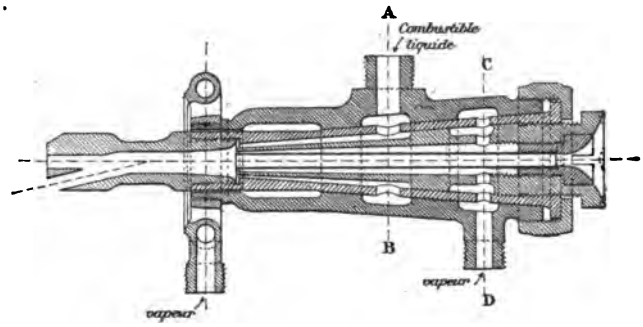


Fig. 267. — Injecteur à pétrole Holden.

Avec le pétrole, la pression se maintient mieux, la mise en charge est très rapide. La machine est pourvue d'un réservoir à combustible liquide de 953 litres de capacité, cette quantité suffisant en général pour un parcours de 320 k.; la quantité consommée variant naturellement avec la nature et le poids du train remorqué. On dépense, en moyenne, par train-kilomètre, 2,97 kg. de charbon et 3,12 kg. d'un mélange de 2/3 de goudron des usines à gaz et de 1/3 d'huile de créosote : ce mélange brûle, comme le pétrole ordinaire, sans aucune fumée.

L'économie donnée par l'emploi de l'appareil Holden est insignifiante, mais ce système permet de revenir à l'emploi soit du charbon soit de l'huile minérale selon les cours et d'en suivre les fluctuations. L'économie n'est pas d'ailleurs son but principal, lequel est d'ordre technique. Les appareils à pétrole permettent d'obtenir par moment une vaporisation très abondante sans que l'intensité de la combustion du charbon placé sur la grille soit accrue. Cela présente plusieurs avantages pour la montée des rampes de grande inclinaison; la Compagnie de l'*Ouest* a fait l'essai des appareils Holden sur des machines-tenders destinées à effectuer le service des trains de Saint-Germain. Le tirage étant très actif pendant la montée de la rampe, les machines arrivent en haut de celle-ci, dans la station, avec un feu très ardent qu'il est impossible de modérer immédiatement; les soupapes crachent fortement et parfois pendant longtemps. Le chauffage au pétrole semble dans l'espèce présenter des avantages.

M. Holden, au *Great Eastern*, a développé dans ces dernières années le

chauffage au pétrole appliqué maintenant à 25 machines de grandes lignes et de banlieue. Depuis le mois de mai 1895, deux locomotives à grande vitesse (roues accouplées de 2,138 m. ; cylindres de 0,483 m. × 0,610 m.; surface de chauffe de 92 m² environ, tubes Serve) sont chauffées uniquement au pétrole, sans addition de charbon dans le foyer. Une notable fraction de l'air appelé dans les pulvérisateurs traverse auparavant des tuyaux à ailettes placés dans la boîte à fumée où ils s'échauffent. La consommation de ces machines, pour un parcours moyen hebdomadaire de 1 600 km., remorquant des trains d'un poids moyen de 200 t., non compris machine et tender, n'a pas dépassé 5,10 kg. de combustible liquide qar kilomètre. La consommation moyenne de charbon des locomotives identiques, attachées au même service et brûlant de la bonne houille, est de 9,95 kg. par kilomètre.

LA CHAUDIÈRE CONSIDÉRÉE COMME APPAREIL D'ÉCHANGE DE CHALEUR ET DE PRODUCTION DE VAPEUR

83. La surface des parois intérieures de la chaudière soumise à l'action de la chaleur du foyer ou des produits de la combustion, c'est-à-dire la *surface de chauffe*, doit être disposée pour absorber, puis transmettre à l'eau qui est en contact avec son autre face, la plus grande partie de la chaleur dégagée.

On appelle *surface directe* celle qui est exposée au rayonnement direct du feu ; elle se compose des parois du foyer, y compris la plaque tubulaire dans les intervalles compris entre les tubes.

La *surface indirecte* ou *tubulaire* est constituée par les parois des tubes que traversent les gaz chauds.

On n'est pas d'accord sur la manière de compter la surface de chauffe; certains comptent la surface intérieure des parois exposées directement au rayonnement ou à l'action des produits de la combustion ; d'autres comptent la surface extérieure de ces parois en contact direct avec l'eau ; d'autres enfin prennent la surface moyenne comme base de leurs calculs. Les chiffres de vaporisation rapportés à la surface de chauffe n'ont rien d'absolu et il importe peu en principe qu'on la compte intérieurement ou extérieurement, il est seulement regrettable que l'on n'ait pas adopté une commune mesure permettant, sans correction préalable, des comparaisons rigoureuses entre les résultats donnés par les chaudières de locomotives appartenant à divers réseaux.

84. Pertes de chaleur. — Quelles que soient les dispositions des chaudières et les précautions prises, il se produit toujours des pertes de chaleur et l'on

n'utilise jamais qu'une fraction, assez considérable il est vrai, de celle que peut produire le combustible.

Nous n'avons plus à parler ici des pertes par combustion incomplète, qui ont fait l'objet des paragraphes précédents ; il nous reste seulement à envisager les pertes dans la transmission du calorique à l'eau de la chaudière et celles qui sont dues au refroidissement extérieur des chaudières, par rayonnement, conductibilité et convection.

Les produits de la combustion quittent le récepteur à une température toujours notablement supérieure à la température extérieure et emportent au dehors une fraction de la chaleur totale qui peut atteindre 20 0/0.

La perte de chaleur due au refroidissement extérieur s'élève, dans les locomotives, à 5 ou 10 0/0.

85. Surface de chauffe directe[1]. — On appelle ainsi, nous l'avons dit, la surface de chauffe exposée directement au rayonnement du foyer. La chaleur lui est communiquée par le rayonnement du foyer et la convection des gaz enflammés. Le calcul indique que la chaleur reçue par mètre carré de surface directe dépend du rapport de la surface de grille à la surface de chauffe directe.

La théorie et la pratique montrent que les parois prennent une température à peu près constante et relativement très peu élevée ; il n'y a donc pas d'inconvénient à exposer une partie de la surface de chauffe au rayonnement direct du foyer, ce qui a d'autre part ce grand avantage de faire transmettre par une faible surface une grande quantité de chaleur et par suite de réduire notablement les dimensions, le poids et le prix des chaudières. On ne doit pas oublier toutefois que la température relativement faible du métal tient essentiellement au refroidissement produit par le contact et le renouvellement rapide de l'eau sur les parois. Il convient donc de disposer les chaudières en vue d'assurer une circulation convenable de l'eau, faute de quoi la température pourrait s'élever assez pour occasionner des coups de feu. L'expérience indique que la nature du métal n'a qu'une influence très secondaire sur la vaporisation des chaudières et qu'il n'y a qu'un très faible avantage à employer à ce point de vue des foyers ou des tubes en cuivre, métal meilleur conducteur que le fer ou l'acier. Nous donnons ci-après, d'après M. L. Ser, quelques chiffres relatifs aux températures des parois dans les foyers de locomotives et propres à fixer les idées :

[1] Voir le *Traité de la Machine à vapeur* de M. E. Sauvage, t. II.

CHARBON brûlé par mètre carré de grille et par heure.	TEMPÉRATURES		
	DU FOYER	DE LA PAROI	
		Cuivre.	Fer.
Kilogrammes.	Degrés.	Degrés.	Degrés.
50	989,3	157,2	161,2
75	1026,4	158,6	163,7
100	1051,9	159,5	165,4
200	1109,9	162,9	178,1
400	1162,1	167,3	185,2

La température des parois est moindre quand la surface directe est plus grande par rapport à la surface de grille, la quantité de chaleur transmise par unité de surface étant plus faible.

Quand les foyers sont en tôle de fer ou d'acier, il est indispensable de s'attacher à obtenir un métal aussi homogène que possible. Si la tôle est mal soudée ou pailleuse, il existe une véritable solution de continuité entre ses molécules ; elle s'échauffe et peut se déformer. C'est une des raisons qui ont toujours fait proscrire l'emploi du fer pour les foyers de locomotives soumis à une si haute température. Le cuivre, généralement employé en Europe, et l'acier, usité aux États-Unis, ne présentent pas ce défaut d'homogénéité.

Les mêmes raisons doivent faire éviter de placer des rivures en un point soumis à l'action de la flamme, surtout pour le tirage forcé. La surépaisseur produite par la superposition des deux plaques et les têtes des rivets, l'imperfection du contact entre les surfaces de ces plaques, ralentissent la conductibilité et augmentent la différence de température entre les deux faces de la paroi. Il peut en résulter un surchauffage du métal et des dilatations ou contractions successives amenant sa fatigue, tendant à séparer les deux plaques et à causer des fuites. Cet inconvénient est un peu moins marqué avec les plaques en cuivre à cause de leur meilleure conductibilité. On ne peut éviter, dans les foyers de locomotives, de placer des rivures exposées au rayonnement, mais on les dispose dans les coins et parfois sur les côtés, en haut, en des points où elles ne subissent pas l'action directe de la flamme.

86. Surface de chauffe indirecte. — La surface indirecte est composée par la paroi des tubes servant à évacuer du foyer les produits de la combustion. Vu le diamètre de ces tubes, les flammes s'y éteignent presque aussitôt qu'elles y pénètrent et la température des gaz s'y abaisse progressivement

puisque, la combustion y étant arrêtée, il n'y a plus de dégagement de chaleur. Cet abaissement de température se produit depuis T, température à laquelle les gaz s'éteignent, jusqu'à une température T′ variable avec la longueur du faisceau tubulaire, l'intensité du tirage, etc.

Pour la surface en contact avec les gaz éteints, à mesure qu'on s'éloigne du foyer, la transmission décroît suivant une progression géométrique quand les surfaces augmentent en progression arithmétique ; en chaque point, la quantité de chaleur transmise est proportionnelle à la différence des températures.

D'après M. L. Ser, les surfaces de chauffe indirecte devraient être ainsi calculées pour obtenir dans la boîte à fumée une température de 250°.

CHARBON BRULÉ par heure et par mètre carré de grille.	CHALEUR transmise par les gaz éteints et par mètre carré de grille.	SURFACE de transmission par mètre carré de grille.	CHALEUR transmise par kilogramme de combustible.
Kilogrammes.	Degrés.	Mètres carrés.	
50	125, 400	26, 66	
75	188, 200	31, 99	
100	250, 800	37, 10	2 508
200	501, 600	56, 88	
400	1 003, 200	85, 32	

Ces conditions étant rarement réalisées dans la pratique, surtout dans les locomotives à grande surface de grille, la température des gaz à leur sortie des tubes est supérieure (elle atteint 300° à 400°) à celle qui a servi de base à ces calculs.

Le faisceau tubulaire horizontal reliant, dans la locomotive, le foyer à la boîte à fumée, et que traversent les produits de la combustion, est aussi ramassé que possible afin de présenter, sous un volume restreint, une surface de chauffe considérable. A cet effet, il est composé de tubes de diamètre aussi petit que le permettent les conditions du service et très rapprochés. On arrive ainsi à grouper jusqu'à 150 m². de surface de chauffe à l'intérieur d'un corps cylindrique de 4.00 m. à 5.00 m. de longueur et dont le diamètre excède rarement 1,50 m.

L'efficacité de la surface de chauffe indirecte ne dépend pas que de son étendue, mais aussi de la manière dont elle est disposée en vue de permettre d'une manière aussi complète que possible le contact des gaz et des parois. Si l'on pouvait remplacer le faisceau tubulaire de la locomotive par un seul carneau intérieur de même surface ayant par conséquent un diamètre très considérable, la plus grande partie des produits de la combustion formant

la veine gazeuse centrale ne viendrait pas en contact direct avec les parois et ne leur céderait qu'une quantité minime de chaleur en raison de la faible conductibilité de la zone gazeuse intermédiaire. On a donc intérêt à diviser, autant qu'on la peut, la masse des gaz chauds afin de l'amener par tous ses points en contact avec les surfaces de chauffe surtout puisqu'il est impossible de créer des remous et de brasser ces gaz à l'intérieur des tubes. C'est ce qu'on réalise par l'emploi de tubes petits et nombreux présentant, à égalité d'encombrement ou de section de passage, le maximum possible en pratique de surface de chauffe et amenant, par l'extrême division du courant gazeux, ces surfaces en contact avec le plus grand nombre de molécules. La capacité de vaporisation se trouve en outre un peu augmentée, dans le cas des tubes de petit diamètre, par la plus faible épaisseur de leurs parois.

Le diamètre minimum que l'on peut donner aux tubes est limité par des considérations pratiques; il doit être assez grand pour que les tubes ne soient pas rapidement bouchés par les escarbilles ou encrassés par les dépôts de suie. En pratique, ce diamètre, mesuré à l'intérieur, descend rarement au-dessous de 40 mm. ; il est le plus souvent de 45 à 48 mm.

La longueur des tubes de locomotives est très considérable parce que l'activité de la combustion, par conséquent la température initiale des gaz et leur vitesse, le sont elles-mêmes. Si la chaudière locomotive devait marcher seulement à tirage naturel, c'est-à-dire brûler dans les environs de 80 kg. de combustible par heure et par mètre carré de surface de grille, on pourrait, en conservant aux tubes leur diamètre usuel, leur donner une longueur de 2,00 m. seulement. S'il en était ainsi toutefois, on préférerait, comme dans certaines installations fixes, conserver aux tubes leur longueur ordinaire et augmenter leur diamètre de manière à réduire la résistance du faisceau et la tendance des tubes à être bouchés par les escarbilles.

L'expérience, surtout d'après les essais effectués sur des chaudières de torpilleurs, paraît montrer qu'il faut, pour assurer l'uniformité du rendement, donner aux tubes, possédant un diamètre intérieur de 40 à 50 mm., une longueur de 1 mètre par chaque centaine de kilogrammes de charbon brûlé par heure et par mètre carré de surface de grille sans descendre jamais au-dessous de 2,00 m. En suivant cette règle pour les locomotives on s'exposerait à adopter des tubes trops courts si l'on se basait sur les faibles tirages et trop longs si l'activité maximum de la combustion était seule considérée. Avec les longueurs usuelles de 4,00 m. environ, on obtient une bonne utilisation moyenne, un peu plus faible pour les forts tirages que pour les tirages modérés. D'ailleurs, les limites supérieure et inférieure de longueur des tubes sont déterminées en pratique par d'autres considérations telles que l'emplacement disponible ou la répartition du poids.

A égalité de tirage, la longueur des tubes devra être d'autant plus grande

que leur diamètre sera plus considérable et l'on admet que, dans les limites usuelles pour les locomotives, des tubes de même longueur relative sont sensiblement équivalents au point de vue de l'utilisation du calorique; toutefois, comme dans ce genre de machines le diamètre des tubes ne varie qu'entre de très étroites limites, on peut considérer leur longueur comme une quantité absolue et établir à ce point de vue des comparaisons entre les différents types de locomotives sans faire intervenir le diamètre des tubes.

La longueur moyenne la plus usuelle mesurée entre les plaques tubulaires, varie entre 3,50 m. et 4,50 m. Les longueurs comprises au-dessus et au-dessous de ces chiffres peuvent être considérées sinon comme rares, du moins comme exceptionnelles. Cependant beaucoup de locomotives anglaises possèdent des tubes de diamètre un peu plus faible que ce qui est d'usage chez nous (36 à 38 mm. intérieurement) et n'ayant qu'une longueur utile de 3,15 m. à 3,30 m. D'autre part beaucoup de locomotives françaises, des types *P.O.* et des anciens types *P.-L.-M.* ont des tubes de 5.00 m. environ de longueur.

Lorsqu'on emploie des tubes à ailettes, les proportions relatives du diamètre et de la longueur se trouvent modifiées, nous le verrons, ces tubes se trouvant, à égalité ou de diamètre ou de surface de chauffe, mieux disposés en vue de l'absorption du calorique.

Le diamètre et la longueur des tubes étant déterminés, leur nombre doit être choisi de telle sorte qu'ils présentent non seulement la surface de chauffe nécessaire mais aussi une section de passage suffisante pour que la résistance subie par les produits de la combustion à leur passage à travers le faisceau, ne soit pas exagérée. Cette résistance étant de beaucoup la principale qu'ait à vaincre le jet d'échappement pour assurer l'appel des gaz, on obtiendra une activité de la combustion d'autant plus grande, à tirage égal, que la section libre sera plus considérable par rapport à la surface de grille supposée dans ce cas proportionnelle au cube des gaz produits dans l'unité de temps. Les tubes à ailettes présentent aussi à ce point de vue un certain avantage, quand on profite suffisamment de leurs propriétés caractéristiques pour accroître leur diamètre dans une proportion convenable.

87. Quantité de vapeur fournie par les surfaces de chauffe. — Cette quantité est essentiellement variable avec la différence des températures, régnant dans les deux régions séparées par les surfaces de chauffe. La température de l'eau à l'intérieur de la chaudière pouvant être considérée comme constante, la production de vapeur par unité de surface sera d'autant moins considérable que l'on s'éloignera davantage du foyer. La température, à l'intérieur de celui-ci, peut s'élever à 1 700 ou 1 800°, tandis que celle des gaz, à l'extrémité du faisceau, est rarement supérieure à 350°.

D'après Péclet, le maximum de vapeur que peut produire dans une heure un mètre carré de surface de chauffe exposée au feu le plus violent que puisse fournir le tirage naturel (combustion de 85 kg. par mètre carré de grille et par heure) est de 100 kg. Entre les limites usuelles, la production est la même quelles que soient l'épaisseur ou la nature des parois. En augmentant l'activité de la combustion, on accroît dans une large mesure la transmission de la chaleur. Les expériences de M. Geoffroy à la *Compagnie du Nord* ont montré que, pour des combustions de 200 à 400 kg. de combustible par heure et par mètre carré de grille, la production de vapeur par mètre carré de surface de chauffe directe varie environ de 120 à 200 kg. par heure. Le faisceau tubulaire d'une locomotive partagé en quatre tronçons a donné au même expérimentateur, pour les mêmes activités de combustion que plus haut, les vaporisations suivantes par mètre carré et par heure :

1er compartiment (voisin du foyer)	26 à 70 kg.
2e —	12 à 33 —
3e —	6 à 21 —
4e —	4 à 14 —

Dans les locomotives, on compte la vaporisation moyenne par mètre carré de surface totale, manière de procéder commode en pratique mais peu rigoureuse, la vaporisation moyenne variant beaucoup, pour une même production totale, suivant la proportion des surfaces de chauffe à la surface de grille. On doit en tout cas établir une distinction entre les locomotives proportionnées normalement, dans lesquelles le rapport de la surface de grille à la surface de chauffe est comprise entre 1/60 et 1/70 par exemple, les machines à tubes très longs où ce rapport varie de 1/80 à 1/90 et les machines à très grand foyer pour lesquelles il est compris entre 1/20 et 1/30. Les premières vaporisent par heure en moyenne de 45 à 80 kg. de vapeur suivant qu'elles sont modérément ou très poussées, les secondes de 30 à 60 kg. et les dernières de 70 à 100 kg. On peut considérer que la majorité des locomotives construites en France sont étudiées et proportionnées pour une production moyenne en service courant de 40 à 65 kg. par mètre carré de surface de chauffe et par heure, mais elles peuvent produire davantage.

A mesure que l'intensité du tirage augmente, le rapport entre les quantité d'eau vaporisée par la surface directe et la surface du faisceau tubulaire extrême diminue. En effet, quand la production des surfaces directes atteint 200 kg. environ par mètre carré, elles produisent à peu près tout ce dont elles sont capables, et un accroissement notable de l'activité de la combustion n'entraîne plus qu'une faible augmentation de la vaporisation de ces surfaces ; les gaz sortent plus chauds du foyer et l'activité du faisceau augmente beaucoup plus rapidement. Si on continue à pousser l'activité du feu, la vapo-

risation devient *relativement* de plus en plus grande à mesure que l'on s'éloigne du foyer ; finalement, la production de la dernière portion des tubes deviendra assez considérable elle-même parce que, au delà d'une certaine limite, les surfaces antérieures n'ayant pas une capacité suffisante laissent les gaz s'échapper à une plus haute température et que l'accroissement de vaporisation d'une surface déterminée, pour une augmentation donnée de température, sera d'autant plus grande que l'intensité absolue de cette vaporisation est plus faible. Ainsi, pour une chaudière locomotive dont le corps cylindrique sera partagé en trois tronçons, on obtiendrait des vaporisations sensiblement proportionnelles aux chiffres ci-dessous en passant d'un tirage déjà actif à un tirage très forcé :

	Surface directe.	Premier compartiment.	Deuxième compartiment.	Troisième compartiment.
Combustion active	30	6	2	1
Combustion très active	57	13	5,6	3,5
Combustion extrêmement active.	60	18	12	10,5

Autrement dit, l'hyperbole représentant la vaporisation se relève et se redresse de plus en plus, à mesure que l'activité de la combustion s'accroît et, les gaz sortant plus chauds, le rendement diminue.

88. Répartition de la chaleur totale. — La chaleur totale que produirait la combustion complète du combustible employé étant représentée par 1.000, il est intéressant de rechercher l'importance relative de la chaleur utilisée et des différentes pertes qui se produisent dans l'appareil de combustion ou dans l'appareil d'échange de chaleur, à savoir :

1° La chaleur C-C_1 non dégagée par suite de la combustion incomplète de l'oxyde de carbone contenu dans les produits de la combustion ou des escarbilles produites ;

2° La chaleur C_2 emmagasinée dans la vapeur produite ;

3° La chaleur C_3 entraînée par les gaz de la combustion ;

4° La chaleur C_4 perdue par rayonnement, conductibilité et convection.

Les expériences de MM. Henry et Ch. Baudry donnent à cet égard des renseignements intéressants et très complets résumés dans le tableau ci-après emprunté à leur Mémoire :

Tubes lisses en laiton. — Répartition de la chaleur totale.

LONGUEUR des tubes.			FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			TEN BRINK		
		Tirages de.	25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
		Chaleur totale C.	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Mètres. 7	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	»	»	»	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2	828	801	765	845	827	808	»	»	»	855	846	809
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	86	86	88	81	83	88	»	»	»	81	83	86
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4	6	23	47	24	30	44	»	»	»	14	11	35
6	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2.	819	783	747	836	818	799	827	808	781	845	827	800
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	95	97	101	84	85	90	87	92	98	84	87	91
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4. . . .	6	30	52	30	37	51	36	40	51	21	26	39
5	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2.	782	765	720	827	808	790	817	799	781	827	818	781
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	106	107	112	89	94	101	93	99	108	91	95	100
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4. . . .	32	38	68	34	38	49	40	42	41	32	27	49
4,50	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2	773	737	702	808	799	780	807	790	763	807	799	772
		entraînée par les gaz de la combustion C_3.	110	113	119	94	101	110	100	106	116	97	101	108
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4. . . .	37	60	79	48	40	50	43	44	51	46	40	59
4	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2	736	710	675	788	771	752	779	762	735	789	771	744
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	117	120	129	103	112	122	110	119	132	105	111	121
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4. . . .	67	80	96	59	57	66	61	59	63	56	58	65
3,50	Chaleur	non dégagée C — C_1.	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2.	690	664	630	760	743	715	741	715	697	750	733	707
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	129	134	148	113	125	136	123	134	150	119	126	138
		perdue par rayonnement et conductibilité C	101	112	122	77	72	89	86	91	83	81	81	85
3	Chaleur	non dégagée C — C_1	80	90	100	50	60	60	50	60	70	50	60	70
		emmagasinée dans la vapeur C_2	635	628	585	713	696	677	694	677	651	703	696	670
		entraînée par les gaz de la combustion C_3	147	155	176	126	141	152	134	149	167	136	145	159
		perdue par rayonnement et conductibilité C_4 . . .	138	127	139	111	103	111	122	114	112	111	99	101

89. Emploi des tubes à ailettes. — On a commencé à employer depuis quelques années des tubes à ailettes du système Serve qui sont caractérisés par l'addition de nervures planes venues de laminage avec le corps du tube, faisant saillie à l'intérieur, et destinées à augmenter la surface de chauffe en contact avec les gaz chauds. Le calorique se transmettant beaucoup moins facilement des gaz au métal des parois que de celui-ci à l'eau, il était rationnel d'augmenter la surface en contact avec les produits de la combustion; la paroi lisse en contact avec l'eau est capable de transmettre une beaucoup plus grande quantité de chaleur qu'elle n'en reçoit des gaz. L'expérience a confirmé cette manière de voir et les tubes à ailettes permettent d'obtenir une même production que des tubes lisses beaucoup plus longs et, par conséquent, de diminuer le poids des machines sans réduire leur puissance ou d'accroître leur puissance sans augmenter leur poids.

Ces tubes se fabriquent, comme les tubes lisses, en laiton, en fer ou en acier. Ils sont maintenant appliqués sur une assez grande échelle par la plupart des grandes Compagnies françaises; celles de *Lyon* et du *Nord* ont été les premières à les appliquer et les ont soumis à des expériences intéressantes dont nous rendrons compte[1]. On a éprouvé au début quelques difficultés par suite de l'obstruction de ces tubes par les escarbilles logées entre les ailettes, mais on en est venu à bout dans la pratique et le nettoyage, opéré à l'aide de jets de vapeur, n'offre plus de difficultés.

Les expériences de la *Compagnie de Lyon* ont porté sur des tubes de 50 et de 65 millimètres de diamètre extérieur. Poursuivies avec une méthode scientifique des plus rigoureuses, elles ont permis d'établir la valeur relative des tubes à ailettes et d'étudier les modifications que leur adoption apportait au rendement et à la production. Les expériences de la *Compagnie du Nord*, également effectuées sur une chaudière fixe, ont eu surtout pour but de comparer les tubes lisses de 50 millimètres aux tubes à ailettes de même diamètre et de même longueur et de rechercher les avantages que pourraient présenter ces tubes dans leur application à des locomotives existantes. En effet, l'application des tubes Serve de gros diamètre (70 millimètres, par exemple), déjà effectuée avant ces essais à des machines express compound de la Compagnie, ne saurait se pratiquer qu'avec une grande lenteur, les plaques tubulaires devant être renouvelées, ce qui ne peut se faire économiquement que quand elles sont hors de service.

Les expériences de la *Compagnie de Lyon* ont donné les résultats consignés dans le tableau ci-dessous emprunté au mémoire de MM. Henry et Ch. Baudry et aux conclusions suivantes :

[1] *Étude expérimentale de la vaporisation dans les chaudières de locomotives.* Mémoire déjà cité. *Note sur les expériences faites au Chemin de fer du Nord sur les tubes à ailerons, système Serve*, par M. Kéromnés, *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, numéro de juillet 1893.

A égalité de tirage, l'*activité de la combustion* est réduite de 9 à 10 0/0 avec la voûte et de 7 à 10 0/0 avec le Ten Brink quand on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de même diamètre; elle augmente, au contraire, de 5 à 6 0/0 avec la voûte et de 1 à 2 0/0 avec le Ten Brink quand on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de 65 millimètres.

La *puissance* (E) est réduite de 7 0/0 au tirage de 25 millimètres et de 5 0/0 au tirage de 75 millimètres quand, avec la voûte en briques, on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de même diamètre. Si ces tubes lisses sont remplacés par des tubes à ailettes de 65 millimètres de diamètre, la puissance de production est augmentée de 5 0/0 au tirage de 25 millimètres et de 3 0/0 au tirage de 75 millimètres.

Dans le cas d'un foyer muni du bouilleur Ten Brink, la puissance est réduite de 3 0/0 au tirage de 75 millimètres lorsqu'on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de même diamètre; lorsque les tubes lisses de 50 millimètres sont remplacés par des tubes à ailettes de 65 millimètres de diamètre, la puissance de production est augmentée de 2 0/0.

Le *rendement économique* $\left(\frac{E}{P}\right)$ est augmenté de 1 0/0 au tirage de 25 millimètres et de 4 à 5 0/0 au tirage de 75 millimètres quand on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de même diamètre, avec la voûte comme avec le Ten Brink.

Quand on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de 65 millimètres, on obtient avec la voûte un rendement plus faible de 2 0/0, tandis que le rendement paraît être le même quand on emploie le Tenbrink.

Escarbilles produites. — La proportion d'escarbilles est sensiblement doublée, au tirage de 25 millimètres, quand on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de 50 ou de 65 millimètres tant avec la voûte qu'avec le Ten Brink; au fur et à mesure que l'on augmente le tirage, le rapport des proportions d'escarbilles décroît rapidement.

Le *degré d'imperfection de la combustion et le volume d'air dépensé par kilogramme de combustible* ne sont pas sensiblement influencés, pour un même foyer, par la forme et la dimension des tubes; ils ne dépendent que de la conduite du feu.

La *température des gaz dans la boîte à fumée* est plus faible de 13 a 18 0/0 avec les tubes à ailettes de 50 millimètres qu'avec les tubes lisses de même diamètre, que l'on emploie la voûte ou le Ten Brink; cette différence est d'autant plus accentuée que le tirage est plus énergique.

Avec la voûte, les tubes à ailettes de 65 millimètres de diamètre donnent une température qui est sensiblement la même que celle qui correspond aux tubes lisses de 50 millimètres; dans le cas d'un foyer muni du bouilleur

Ten Brink, la température des gaz dans la boîte à fumée, d'abord sensiblement la même que celle donnée par les tubes lisses pour le tirage de 25 millimètres, devient plus faible de 6 0/0 au tirage de 75 millimètres.

Le *coefficient économique de la chaudière considérée comme appareil de combustion* est sensiblement le même avec les tubes à ailettes de 50 ou de 65 millimètres qu'avec les tubes lisses de 50 millimètres.

Le *coefficient économique de la chaudière considérée comme appareil d'échange de chaleur* est sensiblement le même, que la chaudière soit munie de tubes lisses de 50 millimètres ou de tubes à ailettes de 65 millimètre de diamètre; mais si l'on remplace les tubes lisses de 50 millimètres par des tubes à ailettes de même diamètre, ce coefficient se trouve amélioré de 3 à 5 0/0.

La *chaleur relative entraînée par les gaz de la combustion* est toujours plus faible avec les tubes à ailettes qu'avec les tubes lisses de 50 millimètres. Cette différence est de 8 à 14 0/0 avec les tubes à ailettes de 50 millimètres et seulement de 4 à 8 0/0 pour les tubes de 65 millimètres.

La chaleur relative perdue par conductibilité et rayonnement est sensiblement plus faible avec les tubes à ailettes de 50 millimètres qu'avec les tubes lisses de même diamètre. Avec les tubes à ailettes de 65 millimètres, elle paraît ne pas différer de celle qui résulte de l'emploi des tubes lisses de 50 millimètres.

A égalité de surface de chauffe intérieure des tubes et de puissance avec voûte courte dans le foyer et tirage moyen, on a remarqué que, à diamètre égal, les tubes à ailettes donnent le même rendement économique que les tubes lisses en exigeant un tirage un peu plus fort. En passant au contraire du tube à ailettes de 50 mm. au tube de 65 mm., on constate que le tirage peut être plus faible, mais que le rendement diminue un peu, le filet gazeux central qui ne vient pas en contact avec les ailettes étant de plus grand diamètre.

Enfin, à égalité de longueur et de diamètre des tubes et à égalité de tirage, on a trouvé que, pour les tubes de 3,00 m., la substitution des tubes à ailettes aux tubes lisses augmente de 76 0/0 la surface de chauffe, diminue de 3 à 6 0/0 la puissance et augmente de 19 à 21 0/0 le rendement.

Pour les tubes de 3,50 m. cette substitution augmente encore de 76 0/0 la surface de chauffe, elle diminue de 9 à 14 0/0 la puissance et augmente de 13 à 16 0/0 le rendement économique.

MM. Henry et Baudry ont indiqué dans leur Mémoire qu'en passant des tubes lisses de 50 mm. et de 4,00 m. de longueur, aux tubes à ailettes de 50 mm. et de 2,50 m. de longueur, on peut gagner 2 156 kg. sur le poids de la chaudière et de l'eau qu'elle contient sans réduire sa puissance. En employant des tubes à ailettes de 65 mm. et de 3,00 m. de longueur, on gagne 1 205 kg.

Comparaison, à égalité de tirage des tubes

(Les tubes ayant la longueur qui donne po

Expériences de

ÉLÉMENTS PRINCIPAUX DE LA CHAUDIÈRE.	*Tubes.*	Métal . . . . .
		Longueur entre plaques tubulaires (en mètres) . . . . .
		Nombre de tubes . . . . .
		Section totale intérieure des tubes. courante (en mètres carrés) . . . . .
		aux viroles du foyer (en mètres carrés) . . . .
	Surface de chauffe.	Du foyer (en mètres carrés) . . . . .
		Des tubes (en mètres carrés). . . . .
		Totale (en mètres carrés) . . . . .
		Tirages de. . . . .
RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES	*Valeurs absolues.*	Combustible brut brûlé par heure (en kilogrammes). . . . .
		Eau vaporisée par heure (en kilogrammes ou en litres). . . . .
		Eau vaporisée par kilogramme de combustible brut (en kilogrammes ou e litres) . . . . .
		Quantité d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible brut brûlé (e kilogrammes). . . . .
		Degré d'imperfection de la combustion. . . . .
		Volume d'air dépensé par kilogramme de combustible brut (brûlé en mètr cubes) . . . . .
		Température des gaz dans la boîte à fumée (en degrés centigrades). . . .
		Chaleur produite (la puissance calorique étant représentée par 100) . . .
		Chaleur emmagasinée dans la vapeur (la chaleur produite étant représent par 100). . . . .
		Chaleur entraînée par les gaz de la combustion (la chaleur produite éta représentée par 100). . . . .
		Chaleur perdue par rayonnement et conductibilité (la chaleur produite éta représentée par 100). . . . .
	Valeurs relatives. (Les chiffres qui se rapportent aux tubes lisses étant représentés par 100.)	Combustible brut brûlé par heure (en kilogrammes). . . . .
		Eau vaporisée par heure (en kilogrammes ou en litres . . . . .
		Eau vaporisée par kilogramme de combustible brut (en kilogrammes ou e litres) . . . . .
		Quantité d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible brut brûlé (e kilogrammes). . . . .
		Degré d'imperfection de la combustion . . . . .
		Volume d'air dépensé par kilogramme de combustible brut brûlé (en mètr cubes) . . . . .
		Température des gaz dans la boîte à fumée (en degrés centigrades). . . .
		Chaleur produite (la puissance calorifique étant représentée par 100) . . .
		Chaleur emmagasinée dans la vapeur (la chaleur produite étant représent par 100) . . . . .
		Chaleur entraînée par les gaz de la combustion (la chaleur produite éta représentée par 100). . . . .
		Chaleur perdue par rayonnement et conductibilité (la chaleur produite éta représentée par 100). . . . .

on lisses et des tubes en laiton à ailettes.

que espèce le maximum de puissance.)

mpagnie de Lyon.

FOYER MUNI D'UNE VOUTE EN BRIQUES COURTE									FOYER MUNI D'UN BOUILLEUR TEN BRINK								
TUBES LISSES e 50 millimètres.			TUBES A AILETTES						TUBES LISSES de 50 millimètres.			TUBES A AILETTES					
			de 50 millimètres.			de 65 millimètres.						de 50 millimètres.			de 65 millimètres.		
Laiton.			Laiton.			Laiton.			Laiton.			Laiton.			Laiton.		
4,000			2,500			3,000			4,000			2,500			3,000		
185			185			113			185			185			113		
0,30747			0,26758			0,30047			0,30747			0,26758			0,30047		
0,18833			0,18833			0,22190			0,18833			0,18833			0,22190		
10,12			10,12			10,12			14,19			14,19			14,19		
106,94			117,14			121,90			106,94			117,14			121,90		
117,06			127,26			132,02			121,13			131,33			136,9		
45	75		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
580	740		395	524	672	460	612	775	435	588	753	395	525	700	445	600	763
5,365	6,666		3,804	5,004	6,357	4,301	5,581	6,859	4,176	5,562	6,860	3,832	5,045	6,664	4,250	5,622	6,997
9,25	9,00		9,63	9,55	9,46	9,35	9,12	8,85	9,6	9,46	9,11	9,7	9,61	9,52	9,55	9,37	9,17
14,8	28,5		18,1	22,8	28,5	17,3	21,5	26,8	8,8	15,0	31,3	15,33	24	31,6	17,7	23,75	28,8
7,9	8,6		7,4	7,7	9,6	10,1	11	10,4	8,3	6,9	7,8	7,7	12,1	9,6	8,2	9,2	8,6
9,3	9,0		9,6	8,9	9,7	8	8	8,2	9,6	9,3	8,9	9,2	9,0	8,9	8,6	8,4	8,7
343	377		274	293	310	317	349	376	302	332	366	264	286	307	298	322	343
94	93		95	93,75	92,5	92	92	91	95	94	93	93,25	92	91	93,75	93,25	92,25
81	79		83	83	84	83	81	80	83	82	80	85	85	86	83	82	81
12,7	14,2		10,8	10,9	12,1	10,8	11,6	12,8	11,1	11,8	13,0	10,1	11,4	11,8	10,8	11,4	12,8
6,3	6,8		6,2	6,1	3,9	6,2	7,4	7,2	5,9	6,2	7,0	4,9	8,6	2,2	6,2	6,6	6,2
100	100		91	90	91	106	106	105	100	100	100	90,5	89,5	93	102	102	101
100	100		93	93	95	105	104	103	100	100	100	91	91	97	102	101	102
100	100		101	103	105	98	98	98	100	100	100	101	102	104	99	99	101
100	100		245	154	100	234	145	94	100	100	100	174	160	100	201	158	92
100	100		95	98	111	130	139	121	100	100	100	93	175	123	99	133	111
100	100		101	96	108	84	86	91	100	100	100	96	97	100	99	90	98
100	100		87	85	82	101	102	100	100	100	100	87	86	84	90	97	94
100	100		100	100	100	97	98	98	100	100	100	98	98	98	99	99	99
100	100		101	102	106	101	100	101	100	100	100	102	104	110	100	100	101
100	100		93	86	85	93	91	90	100	100	100	91	97	91	97	97	98
100	100		97	97	57	97	117	106	100	100	100	83	138	31	105	106	88

Tableau résumant les expériences faites sur les tubes lisses, l

Expériences de

DÉSIGNATION des TUBES	SURFACE de la grille.	SURFACE de chauffe totale.	SECTION de passage des gaz dans les tubes.	INDICATION du tirage.	DÉPRESSION moyenne dans la boîte à fumée.	NOMBRE de tours moyen des ventilateurs.	TEMPÉRATURE moyenne dans la boîte à fumée.	CONSOMMATION MOYENNE de combustible. Totale en 11 heures.	Par heure.	Par m de surface de grille et par heure.
	m. carré.	m. carré.	m. carré.		millim.		degré c.	kilogr.	kilogr.	kilogr.
Tubes lisses.	1,34	114,53	0,264006	naturel	10	»	208	1 507,8	137	102,
				forcé	30	500	268	1 929,7	175,4	130,
				—	50	778	276	3 344,5	304,0	226,
				—	80	959	296	3 950,5	359,1	267,
Tubes à ailerons de 11 mm. de hauteur.	1,34	217,06	0,237712	naturel	14	»	135	1 430,5	130,0	97,
				forcé	25	358	156	1 556,5	141,5	105,
				—	30	437	162	1 557,5	141,6	105,
				—	50	637	165	2 543,0	231,1	172,
				—	60	664	167	2 646,5	240,6	189,
				—	80	808	170	2 722,5	247,5	184,
				—	120	941	171	2 732,5	248,4	185,
Tubes mi-partie lisses et mi-partie à ailerons de 9 mm. de hauteur.	1,34	160,33	partie lisse 0,264006 partie à ailerons 0,249813	—	25	517	160	2 277,0	207,0	155,
				—	45	677	165	2 754,5	250,4	186,
				—	50	713	167	2 859,5	259,9	193,
				—	60	806	170	2 956,5	268,7	200,
				—	80	888	187	3 422,3	311,1	232,
				—	100	1 108	188	3 865,0	351,3	262,
				—	120	1 197	200	3 543,0	466,8	348,
Tubes à ailerons de 7 mm. de hauteur.	1,34	183,83	0,254793	—	30	477	150	1 064,0	266,0	198,
				—	50	680	159	3 255,0	295,9	220,
				—	80	880	179	4 410,0	400,9	299,
				—	100	1 079	193	2 497,0	416,1	310,
				—	120	1 253	215	5 501,0	500,0	373,
Tubes mi-partie lisses et mi-partie à ailerons de 7 mm. de hauteur.	1,34	151,99	partie lisse 0,264006 partie à ailerons 0,254793	naturel	11	»	140	1 466,0	133,3	99,
				forcé	50	670	210	2 939,0	267,1	199,
				—	80	898	224	3 333,0	303,0	226,
				—	100	1 111	240	2 367,0	394,5	294,
				—	120	1 288	245	3 989,0	362,6	270,

Nota. — Le coke retiré des résidus étant brûlé ultérieurement, il n'est pas compté dans la proportion des résidus. Le combustibl

bes à ailerons et les tubes mi-partie lisses et mi-partie à ailerons.
ompagnie du Nord.

ANTITÉ MOYENNE l'eau vaporisée.		VAPORISATION moyenne.		POIDS MOYEN des résidus.			PROPORTION p. 100 des résidus rapportée au charbon brûlé.	TENEUR p. 100 en cendres du charbon.	PROPORTION p. 100 du charbon non brûlé.	OBSERVATIONS
otale en eures.	Par heure.	Par kilogramme de combustible.	Par m² de surface de chauffe totale et par heure.	Escarbilles	Mâchefers	Coke.				
cube.	m. cube.	litre.	litre.	kilogr.	kilogr.	kilogr.				
,961	1,087	7,932	9,49	125,6	68	26,3	12,8	7,4	5,4	La chaudière est isolée des autres chaudières.
,975	1,270	7,242	11,08	127,7	74,7	11,2	10,4	7,4	3,0	
,795	2,345	7,712	20,47	174,5	121,5	13,0	8,5	7,4	1,1	La chaudière est en communication avec les autres chaudières.
,963	2,542	7,078	22,19	163,5	157,5	14,5	8,1	7,4	0,7	
,868	1,078	8,296	4,96	109,8	101,3	13,5	14,7	7,4	7,3	La chaudière est isolée des autres chaudières.
,195	1,199	8,477	5,52	101,0	66,5	13,0	10,7	7,4	3,3	
,669	1,242	8,776	5,72	89,5	73,5	13,0	10,4	7,4	3,0	
,790	1,890	8,175	8,70	163,0	137,0	29,0	11,7	7.4	4,3	L'état du feu laisse à désirer.
,177	2.107	8,758	9,70	152,5	132,0	24,5	10,7	7,4	3,3	
,234	2,111	8,534	9,77	171,0	152,9	21,7	11,8	7,4	4,4	
,418	2,129	8,570	9,80	242,0	179,0	28,0	15,4	7,4	8,0	
,902	1,718	8,301	10,71	141,5	107,5	11,5	10,9	7,4	3,5	
,486	2,226	8,889	13,88	181,0	163,0	9,5	12,4	7,4	5,0	
,325	2,302	8,856	14,35	161,0	150,0	10,0	10,8	7,4	3,4	
,871	2,260	8,412	14,09	155,0	143,5	8,0	10,0	7,4	2,6	La chaudière est en communication avec les autres chaudières.
714	2,600	8,390	16,21	197,6	184,3	16,6	11,1	7,4	3,7	
882	3,080	8,766	19,21	221,0	293,0	17,0	13,2	7,4	5,8	
539	3,631	7,772	22,64	265,0	245,0	27,0	14,3	7,4	6,9	Ces chiffres se rapportent à une marche de 7 h. 35.
548	2,387	8,973	12,98	71,0	40,0	3,0	10,4	7,4	3,0	Ces chiffres se rapportent à une marche de 4 heures.
,099	2,736	9,247	14,88	176,0	135,0	5,0	9,5	7,4	2,1	
,968	3,542	8,836	19,26	295,0	212,0	8,0	11,4	7,4	4,0	
,837	3,806	9,145	20,76	110,0	114,9	4,0	8,9	7,4	1,5	Ces chiffres se rapportent à une marche de 6 heures.
970	4,179	8,356	22,73	210,0	246,0	8,0	8,4	7,4	1,0	
,071	1,188	8,916	7,81	88,5	77,6	6,7	11,3	7,4	3,9	La chaudière est isolée des autres chaudières.
,744	2,431	9,099	15,99	145,0	162,0	4,0	10,4	7,4	3,0	
,957	2,723	8,987	17,91	144,0	155,0	7,0	8,9	7,4	1,5	La chaudière est en communication avec les autres chaudières.
,598	3,433	8,702	22,58	91,0	149,0	4,0	10,1	7,4	2,7	
,738	3,067	8,457	20,17	267,0	233,0	8,0	12,5	7,4	5,1	

ûlé dans ces expériences était du tout-venant de Lens.

D'autre part, les expériences de la Compagnie du Nord dont les résultats principaux sont consignés dans le tableau ci-dessus, ont conduit M. Kéromnés aux conclusions suivantes :

En comparant la vaporisation moyenne, par kilogramme de combustible, donnée par les diverses tubulures à ailerons, avec celle à tubes lisses, pour les dépressions que l'on obtient couramment sur les locomotives, on trouve que les tubes à ailerons ont donné sur les tubes lisses une augmentation de vaporisation de :

Tubes à ailerons de 11 mm. de hauteur	4,589 p. 100	au tirage naturel.	
	21,181 —	avec 30 mm. de dépression.	
	20,570 —	avec 80 mm.	—
Tubes mi-partie lisses, mi-partie à ailerons de 9 mm. de hauteur. . .	14,834 p. 100	avec 50 mm. de dépression.	
	18,536 —	avec 80 mm.	—
Tubes à ailerons de 7 mm. de hauteur	23,902 p. 100	avec 30 mm. de dépression.	
	19,904 —	avec 50 mm.	—
	24,837 —	avec 80 mm.	—

Il est permis de conclure de ces résultats, qu'il paraît possible d'appliquer les tubes Serve sur les machines existantes, en conservant aux tubes leur longueur, d'une part; d'autre part, en augmentant légèrement leur diamètre, en réduisant la hauteur des ailerons et, au besoin, en ne faisant commencer ces ailerons qu'à une distance convenable de la plaque tubulaire du foyer.

La seule difficulté qui puisse se présenter, consiste dans l'obstruction des tubes. Le ramonage des tubes ne peut plus se faire à l'aide de la tringle ordinaire garnie d'une mèche de chanvre. On met entre les mains du personnel une lance spéciale à vapeur.

Le tableau ci-après donne, pour quatre types de machines de la *Compagnie du Nord*, l'augmentation de surface de chauffe résultant de l'application des tubes à ailettes par comparaison avec les tubes lisses :

DÉSIGNATIONS	LOCOMOTIVES A GRANDE VITESSE Longueur des tubes : 3,500		LOCOMOTIVES MIXTES Longueur des tubes : 3,800		LOCOMOTIVES A 4 ESSIEUX COUPLÉS Longueur des tubes : 4.090		LOCOMOTIVES COMPOUND Longueur des tubes : 3,900	
	Tubes lisses.	Tubes à ailerons	Tubes lisses.	Tubes à ailerons	Tubes lisses.	Tubes à ailerons	Tubes lisses.	Tubes à ailerons
Diamètre extérieur des tubes	45	70	50	70	50	70	45	70
Nombre des tubes.	201	96	160	88	197	130	202	94
Surface de chauffe des tubes. m. carrés.	88,38	129,60	86,00	134,00	114,06	210,49	98,98	144,43
Section de passage des gaz	0,2510	0,2910	0,2550	0,2640	0,3133	0 3900	0,2520	0,2820
Surface des tubes baignée par l'eau. mètres carrés.	100,00	74,23	93,00	73,50	126,78	117,12	110,50	81,00
Surface de la grille. . mètres carrés.	2,31		1,60		2,08		2,04	

On voit que la surface de chauffe, évaluée en comptant le développement des ailerons, a été augmentée malgré la diminution du nombre des tubes, ainsi que la section de passage des gaz; seule, la surface des tubes baignée par l'eau se trouve réduite, mais cet inconvénient est relativement faible.

L'emploi des tubes Serve a permis, à la *Compagnie de Lyon*, de réduire notablement la longueur et le poids des chaudières de ses machines express, tout en augmentant légèrement la surface de chauffe; ainsi :

DÉSIGNATION DES MACHINES	111-400 TUBES LISSES	C-21-60 TUBES A AILETTES
Nombre de tubes	185	133
Diamètre extérieur des tubes	50	65
Longueur des tubes entre plaques	4,495 m.	3,000 m.
Surface de chauffe tubulaire	132,21 m².	137,38 m².

La *Compagnie de l'Est* a commencé en 1893 l'application des tubes Serve, effectuée pour la première fois sur les machines express 506 et 510. Les résultats ont été satisfaisants et l'application a été étendue à d'autres machines. Le tableau ci-dessous permet de se rendre compte des conditions dans lesquelles s'est faite l'application aux machines 506 et 510.

DÉSIGNATIONS	LOCOMOTIVE N° 507	LOCOMOTIVE N° 510	OBSERVATIONS
Type des tubes	Lisses.	A ailettes syst. Serve.	
Diamètre extérieur des tubes	48,75 mm.	70 millim.	
— intérieur des tubes	44 millim.	64,4	
Longueur des tubes à l'extérieur des plaques tubulaires	3,555 m.	3,555 m.	Dont 0,195 m. de tube lisse les ailettes des extrémités ayant été enlevées.
Nombre de tubes	178	95	
Surface de chauffe. du foyer	9,08 m².	9,04 m².	
Surface de chauffe. des tubes (à l'intérieur)	88,01	118,19	
Surface de chauffe. totale	97,09	127,23	
Section à travers les tubes	0,2706	0,2818	
Volume d'eau contenu dans la chaudière, 0,250 m. au-dessus du ciel du foyer	3,186 m³.	3,030 m³.	

Des essais d'allumage ont été effectués sur les machines 501 et 510 du dépôt de Châlons; ils comportaient trois genres d'opérations :

1° Allumage par tirage naturel sous hotte dans la remise;

2° Allumage par tirage naturel en plein air, jusqu'à ce que la pression atteigne 1 kilogramme; puis usage du souffleur annulaire ordinaire;

3° Allumage en plein air, puis 10 minutes après, emploi du tuyau souffleur

annulaire portatif actionné par une machine voisine, à 10 kilogrammes de pression.

Ces expériences, faites à deux reprises dans les mêmes conditions, ont donné des résultats identiques résumés au tableau suivant, indiquant le temps total de mise en pression :

CAS	1re SÉRIE D'ESSAIS			2e SÉRIE D'ESSAIS		
	Machine 507. Tubes ordinaires.	Machines 510. Tubes Serve.	Différence.	Machine 507. Tubes ordinaires.	Machines 510. Tubes Serve.	Différence.
1er cas.	2h29′	2h53′	+ 24′	2h18′	2h46′	+ 28′
2e —	2h03′	2h17′	+ 14′	1h58′	2h11′	+ 13′
3e —	1h 1′30″	1h35″	+ 1′35″	0h57′45″	1h0′10″	+ 2′25″

Il ressort de ce tableau que la durée de mise en pression avec les tubes Serve est plus longue qu'avec les tubes ordinaires, mais la différence devient insensible lorsqu'on emploie le tirage artificiel.

La production en cours de route est supérieure à celles des machines munies de tubes ordinaires; la pression se maintient bien, même avec des trains assez chargés et avec une admission de vapeur plus grande; elle est moins sujette aux variations. La résistance au passage des gaz est diminuée et ce n'est que dans des circonstances difficiles et par les mauvais temps, qu'il est nécessaire de serrer légèrement l'échappement.

La tenue du feu sur la grille est bonne et la combustion se fait régulièrement. On a constaté des entraînements un peu plus grands dans la boîte à fumée, et quelquefois des escarbilles assez grosses.

En résumé, les tubes à ailettes semblent nettement avantageux; ils permettent d'accroître un peu l'utilisation et de réduire très notablement la longueur du corps cylindrique et le poids des chaudières. C'est surtout leur prix encore élevé qui en a retardé la généralisation.

90. Influence de l'intensité du tirage sur la production de vapeur. — Lorsque, dans une chaudière locomotive de dimensions données, on accroît progressivement le tirage, la production de vapeur augmente d'abord, tant que ce tirage reste modéré, dans la même proportion que la consommation de combustible; puis, dès que le point correspondant à la limite du maximum d'utilisation économique est dépassé, dans une moindre mesure, successivement décroissante. Pour qu'il en fût autrement, il faudrait pouvoir allonger les tubes au fur et à mesure que l'activité de la combustion se trouve augmentée afin que les gaz parviennent dans tous les cas à la même température dans la boîte à fumée. Ce phénomène est intimement lié à la variation

parallèle du rendement que nous étudierons plus loin ; la vaporisation par unité de poids de combustible décroissant quand le tirage augmente, il doit en être de même de la vaporisation totale relativement au poids de combustible brûlé sur la grille. En outre, l'intensité de la combustion ne subit pas une marche ascendante aussi rapide que le tirage.

Ce double fait est nettement mis en évidence par les chiffres ci-dessous relevés au cours des essais effectués dans les ateliers de la *Compagnie du Nord*.

CONSOMMATION de combustible par mètre carré de grille et par heure.	QUANTITÉ MOYENNE d'eau vaporisée par heure.	DÉPRESSION dans la boîte à fumée.	TEMPÉRATURE dans la boîte à fumée.
Kilogr.	Lit.	Millim.	Degrés centigr.
102,3	1 087	(Tirage naturel) 10	208
130,8	1 270	30	268
226,8	2 345	50	276
267,9	2 542	80	296

Ces résultats, quoiqu'un peu exceptionnels, montrent que l'activité de la combustion et de la vaporisation, au delà d'une certaine limite correspondant par exemple, pour les expériences citées, à un tirage de 50 mm., n'augmente plus que très lentement même pour une forte augmentation du tirage. Ainsi, à un accroissement de tirage de 30 mm., au delà de la limite indiqué, correspondent les très faibles augmentations de 41 kg. de charbon brûlé par heure et mètre carré de grille et de 200 kg. environ de vapeur fourni par heure.

Les expériences de la *Compagnie de Lyon* ont porté sur une chaudière possédant plus d'élasticité et dont la limite de bonne vaporisation se trouvait plus élevée et n'a d'ailleurs pas été atteinte au cours des essais. Les résultats obtenus sont consignés ci-dessous :

	LONGUEUR des tubes.	FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			TEN BRINCK		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
Eau vaporisée par heure en kilogrammes.	7	3 600	4 959	6 279	3 120	4 430	5 740	»	»	»	3 140	4 548	5 825
	6	3 678	5 029	6 370	3 250	4 540	5 850	3 528	4 806	6 134	3 365	4 780	6 056
	5	3 900	5 248	6 655	3 510	4 831	6 120	3 781	5 100	6 473	3 885	5 273	6 604
	4,50	4 023	5 333	6 760	3 700	4 990	6 251	3 997	5 295	6 636	4 112	5 510	6 839
	4	4 045	5 326	6 716	3 800	5 030	6 244	4 108	5 365	6 666	4 176	5 562	6 260
	3,50	3 908	5 177	6 499	3 740	4 900	6 080	4 041	5 247	6 510	4 054	5 406	6 668
	3	3 667	4 907	6 136	3 580	4 675	5 800	4 824	4 998	6 200	3 844	5 150	6 341

Nous donnons ci-dessous d'autres résultats d'expériences effectuées par la même Compagnie sur les chaudières à tubes lisses des locomotives com-

Expériences sur les chaudières à tubes lisses des locomotiv

	TIMBRE	GRILLE	TUBES				
			DIAMÈTRE extérieur.	NOMBRE	LONGUEURS entre les plaques tubulaires.	SECTION de passage des gaz. Au milieu.	SECTION de passage des gaz. Aux virole de boîte à fe
	Kilogr.	M. carrés.	Millim.		Mètres.	M. carrés.	M. carrés
Locomotive compound à grande vitesse, C-1. Tubes de 50 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 1,212 m. Après un parcours de 62086 kilomètres.	15	2,34	50	185	4,035	0,3021	0,1957
Locomotive compound à grande vitesse, C-2. Tubes de 45 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 1,212 m. Après un parcours de 92742 kilomètres.	15	2,34	45	224	4,035	0,2957	0,180
Locomotive compound à marchandises, n° 3201. Tubes de 45 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 1,154 m. Après un parcours de 50627 kilomètres.	15	2,37	45	247	4,350	0,3260	0,198
Locomotive compound à marchandises, n° 3202. Tubes de 40 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 1,154 m. Après un parcours de 49618 kilomètres.	15	2,37	40	307	4,350	0,3193	0,175
Locomotive compound pour lignes à fortes rampes, n° 4301. Tubes de 50 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 0,956 m. Après un parcours de 37991 kilomètres.	15	2,18	50	247	4,150	0,4033	0,263
Locomotives compound pour lignes à fortes rampes, n° 4302. Tubes de 55 millim. de diamètre (en fer). Voûte de 0,956 m. Après un parcours de 44830 kilomètres.	15	2,18	55	210	4,150	0,4223	0,29

pound construites en 1889 et dans lesquelles l'activité du tirage a été poussée plus loin :

struites en 1887 par la Compagnie de Lyon (tubes en fer).

RFACE DE CHAUFFE				RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES				
ER	TUBES	TOTALE	Tirages de	25	45	75	100	120
rrés	M. carrés.	M. carrés.		Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.
62	107,86	119,48	Consommation de combustible par heure.	427	564	708	820	910
			Eau vaporisée par heure	3 786	4 930	6 100	6 888	7 280
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	8,87	8,74	8,62	8,40	8,00
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible.	14	17,5	23,1	27,8	31,5
62	116,41	128,03	Consommation de combustible par heure.	415	540	683	780	850
			Eau vaporisée par heure	3 652	4 730	5 880	6 591	7 038
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	8,80	8,76	8,61	8,45	8,28
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible	11,13	15,5	19,9	27,5	32
47	138,39	148,86	Consommation de combustible par heure.	445	580	732	848	920
			Eau vaporisée par heure	3 973	5 092	6 259	7 047	7 452
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	8,93	8,78	8,55	8,31	8,10
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible.	9,5	13,3	19	27,7	27,7
48	152,71	163,19	Consommation de combustible par heure.	415	534	673	770	846
			Eau vaporisée par heure	3 756	4 795	5 943	6 684	7 191
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	9,05	8,98	8,83	8,68	8,50
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible.	11	14,4	19,6	24	27,7
96	146,72	157,68	Consommation de combustible par heure.	524	668	865	1 018	1 135
			Eau vaporisée par heure	4,716	5 858	7 291	8 144	8 625
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	9	8,77	8,43	8	7,5
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible	25,2	27,2	44	63,3	94,5
94	138,57	149,51	Consommation de combustible par heure.	563	738	960	1 130	1 250
			Eau vaporisée par heure	4814	6243	7 920	8 870	9 375
			Eau vaporisée par kilogramme de combustible.	8,55	8,46	8,25	7,85	7,5
			Proportion d'escarbilles pour 1 000 kilogrammes de combustible	17,5	32	57	82	104

D'autre part, les tubes en laiton à ailettes ont donné les résultats suivants :

TIRAGES MILLIMÈTRES	LONGUEUR DES TUBES	TUBES A AILETTES DE 50 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR									
		VOUTE					TEN BRINCK				
		25	45	75	100	120	25	45	75	100	120
N° 18. — Eau vaporisée par heure (en kilogrammes).	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	3,500	3 365	4 635	5 910	6 762	7 298	»	»	»	»	»
	3	3 398	4 724	6 014	6 919	7 449	»	»	»	»	»
	2,500	3 804	5 004	6 357	7 292	7 814	3 832	5 045	6 664	7 708	8 388
	2	3 815	4 995	6 313	7 232	7 840	4 019	5 254	6 585	7 535	8 181

TIRAGES MILLIMÈTRES	LONGUEUR DES TUBES	TUBES A AILETTES DE 65 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR									
		VOUTE					TEN BRINCK				
		25	45	75	100	120	25	45	75	100	120
N° 18. — Eau vaporisée par heure (en kilogrammes).	4	4 246	5 475	6 709	7 498	7 903	4 170	5 379	6 699	7 506	7 972
	3,500	4 258	5 507	6 752	7 637	8 163	4 210	5 434	6 750	7 573	8 190
	3	4 301	5 581	6 859	7 853	8 432	4 250	5 622	6 997	7 874	8 544
	2,500	4 089	5 314	6 480	7 243	7 780	4 082	5 374	6 624	7 354	7 938
	2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Les conclusions de MM. Henry et Baudry relativement aux tubes lisses ont été les suivantes :

Le tirage agit sur la puissance de production de la même manière, mais dans une moins forte mesure que sur l'activité de la combustion. Quand on passe du tirage de 45 à celui de 25 mm., la production diminue de 23 à 31 0/0, suivant le foyer et la longueur des tubes : il augmente au contraire de 23 à 29 0/0 quand on passe du tirage de 45 à celui de 75 mm.

91. Influence de l'intensité du tirage sur le rendement économique. — La longueur des tubes et l'étendue de surface de chauffe ne sauraient être, dans la locomotive, proportionnés en vue de permettre un fonctionnement aussi économique, quand le tirage atteint son maximum d'intensité, que pour une allure modérée, en raison de la limite de poids imposée à la chaudière.

La surface de chauffe ne pouvant être accrue en même temps que l'intensité du tirage, il en résulte que l'augmentation de ce dernier, surtout au delà d'une certaine limite, entraîne une réduction de l'utilisation économique.

Les parois de la chaudière ne peuvent, dans l'unité de temps, laisser passer qu'une quantité déterminée de chaleur ; lorsque le feu est modérément poussé, la surface directe absorbe une très grande partie du calorique dégagé et les gaz pénètrent à une température relativement peu élevée dans le faisceau tubulaire d'où ils sortent en emportant le minimum de calories, le système tubulaire pouvant suffire à les dépouiller de presque toute la chaleur qu'ils possèdent. Lorsque, l'activité de la combustion augmentant, la surface directe ne peut plus laisser passer une aussi grande fraction de la chaleur totale dégagée, la température des gaz à leur entrée dans le faisceau tubulaire se trouve augmentée et, passée une certaine limite rapidement atteinte, ils en sortent aussi plus chauds, parce que la capacité d'absorption se trouve elle-même dépassée et que, vu le plus grand volume des produits de la combustion à écouler par unité de temps, leur vitesse est plus considérable. L'échange de calorique entre les gaz et les parois ne peut s'effectuer instantanément ; il faut, pour que le phénomène se produise dans de bonnes conditions, lui allouer un temps raisonnable.

En principe, on peut dire que le rendement de la chaudière diminue constamment quand le tirage augmente et d'autant plus que les tubes sont plus courts, et que l'influence de l'augmentation du tirage est plus grande pour le foyer ordinaire que pour ceux possédant une voûte en briques ou un bouilleur Ten Brinck. Cependant, dans certains cas, le rendement le plus économique ne correspond pas à l'allure la plus réduite, il passe par un maximum lorsque l'activité de la combustion atteint une valeur intermédiaire, sans doute parce que la combustion se fait mieux. Ainsi, dans les essais du *Nord* dont nous avons parlé plus haut, la vaporisation par kilogramme a été de :

7,24 kg.	pour un tirage de	30	mm.
7,71 —	—	50	—
7,08 —	—	80	—

passant ainsi par un maximum aux environs de 50 mm.

Avec les tubes à ailettes les choses se passent de même, seulement la limite économique se trouve reculée, comme on pourra s'en rendre compte par l'examen des différents tableaux que nous donnons dans ce chapitre.

La chaudière qui a servi aux expériences de la *Compagnie de Lyon* a donné des résultats d'autant plus économiques que le tirage était plus faible. Avec le foyer ordinaire, en passant du tirage de 45 mm. à celui de 25, le rendemunt s'accroissait de 3,6 à 4.2 0/0 et diminuait au contraire de 4.5 à 5,8 0/0

quand on passait du tirage de 45 mm. à celui de 75. Les résultats obtenus avec les tubes lisses et à ailettes sont relatés dans les tableaux suivants :

TIRAGE MILLIMÈTRES	LONGUEUR DES TUBES	TUBES LISSES											
		FOYER ORDINAIRE			VOUTE LONGUE			VOUTE COURTE			TEN BRINCK		
		25	45	75	25	45	75	25	45	75	25	45	75
N° 3. — Eau vaporisée par kilogramme de combustible brut. (Rendement économique.)	7	10,20	9,84	9,40	10,29	10,11	9,89	»	»	»	10,43	10,29	9,94
	6	9,94	9,58	9,14	10,22	10,04	9,82	10,11	9,85	9,60	10,29	10,15	9,80
	5	9,65	9,29	8,85	10,08	9,90	9,68	10,03	9,77	9,52	10,09	9,95	9,60
	4,50	9,40	9,04	8,60	9,90	9,72	9,50	9,87	9,61	9,36	9,91	9,77	9,42
	4	9,01	8,66	8,22	9,62	9,42	9,20	9,51	9,25	9,00	9,60	9,46	9,11
	3,50	8,47	8,14	7,70	9,22	9,00	8,78	9,02	8,76	8,51	9,15	9,01	8,66
	3	7,87	7,55	7,11	8,70	8,47	7,23	8,48	8,22	7,97	8,62	8,48	8,13

TIRAGES MILLIMÈTRES	LONGUEUR DES TUBES	TUBES A AILETTES DE 50 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR									
		VOUTE					TEN BRINCK				
		25	45	75	100	120	25	45	75	100	120
N° 19. — Eau vaporisée par kilogramme de combustible brut (en kilogrammes). (Rendement économique.)	4	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
	3,50	9,95	9,90	9,85	9,80	9,77	»	»	»	»	»
	3	9,85	9,78	9,70	9,61	9,55	»	»	»	»	»
	2,50	9,63	9,55	9,46	9,35	9,28	9,7	9,61	9,52	9,40	9,32
	2	9,35	9,25	9,15	9,04	8,95	9,39	9,30	9,21	9,10	9,02

TIRAGES MILLIMÈTRES	LONGUEUR DES TUBES	TUBES A AILETTES DE 50 MILLIMÈTRES DE DIAMÈTRE EXTÉRIEUR									
		VOUTE					TEN BRINCK				
		25	45	75	100	120	25	45	75	100	120
N° 19. — Eau vaporisée par kilogramme de combustible brut (en kilogrammes). (Rendement économique.)	4	9,65	9,44	9,19	8,99	8,83	9,70	9,52	9,33	9,21	9,07
	3,50	9,57	9,35	9,10	8,89	8,73	9,68	9,50	9,31	9,18	9,05
	3	9,35	9,12	8,85	8,63	8,43	9,55	9,37	9,17	9,03	8,90
	2,50	8,70	8,40	8,10	7,83	7,59	9,05	8,81	8,51	8,30	8,10
	2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»

Les chaudières des locomotives express du *London and South Western Ry*, soumises en service à des essais dont nous parlons dans un autre chapitre,

ont produit 9,68 kg. de vapeur par kilogramme de charbon (Cardiff de la meilleure qualité) lorsqu'on brûlait 660 kg. de combustible par mètre carré de grille et par heure, ce qui est la limite économique de ces chaudières, étudiées en vue d'un tirage très actif. Pour une combustion de 866 kg. par mètre carré de grille et par heure, la vaporisation tombait à 7,91 kg., chiffre encore très élevé pour une allure aussi poussée et qui semble indiquer une forte proportion d'eau entraînée.

Une locomotive du *Cincinnati Hamilton and Dayton RR.*, expérimentée par M. Hill, vaporisait 7,07 kg. de charbon par kilogramme de charbon quand on brûlait dans le foyer 410 kg. de charbon par heure et par mètre carré de grille ; la vaporisation tombait à 6,21 kg. pour une combustion de 570 kg. et à 4,57 kg. pour une combustion de 640 kg. Cette chaudière n'était nullement proportionnée pour une allure aussi poussée et donnait de très mauvais résultats économiques.

Des essais effectués par le *Chicago and North Western* en 1896, ont donné les résultats suivants :

	Poids de charbon[1] brûlé par mètre carré de surface de grille et par heure.	Vaporisation correspondante par kilogramme de charbon.
Machine N° 19.	290 kg	8,95 kg.
S = 1,66 m²	336 —	8,50 —
S = 99,00 —	473 —	7,80 —
(Moyenne de 15 expériences.)	610 —	6,80 —
Machine N° 567	430 —	8,00 —
S = 1,80 m²	525 —	6,20 —
S = 99,00 —	685 —	6,00 —
(Moyenne de 21 expériences.)		
Machine N° 940	425 —	7,60 —
S = 1,65 m²	605 —	6,60 —
S = 121,00 —	704 —	6,20 —
(Moyenne de 13 expériences.)	803 —	5,80 —
	1040 —	5,45 —
Machine N° 941	450 —	7,50 —
S = 1,65 m²	575 —	6,70 —
S = 121,00 —	682 —	6,30 —
(Moyenne de 13 expériences.)	850 —	5,80 —

La loi de décroissance de la vaporisation, à mesure que croît l'intensité de la combustion, est bien marquée et assez régulière.

La vaporisation par kilogramme de charbon brûlé exprime en dernière analyse l'utilisation économique de la chaudière, produit des utilisations distinctes des appareils de combustion et d'échange de chaleur.

On peut représenter, graphiquement et indépendamment, les différentes

[1] *Indian Coal.*

pertes que subit le rendement de la chaudière à mesure que l'on active le tirage. Supposons (fig. 268) que *ab* soit la courbe de vaporisation par unité de poids de combustible brûlé. Si le rendement de l'appareil d'échange de chaleur était égal à l'unité, autrement dit si la chaleur développée dans le foyer était également utilisée pour tous les degrés de combustion, la courbe de vaporisation remonterait en *ac*. S'il n'y avait pas d'entraînement d'escarbilles dans la boîte à fumée, cette courbe viendrait en *ad*. Dans le cas où l'accroissement de l'activité de la combustion n'entraînerait aucune perte par combustion incomplète, excès d'air, etc., la vaporisation serait représentée par la droite *ae* parallèle à l'axe des *x*; le rendement serait constant pour tous les tirages. Autrement dit, dans les conditions normales, l'aire *acb* représente la perte due à l'insuffisance d'efficacité de la surface de chauffe, l'aire *adc* la perte due à l'entraînement des escarbilles et l'aire *aed* la perte provenant de l'imperfection de la combustion.

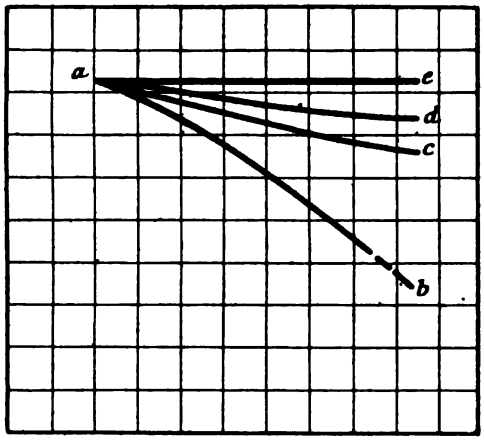


Fig. 268. — Courbes des rendements de la chaudière.

Par suite de la position de la tuyère d'échappement, de la disposition générale des chaudières locomotives, et de différentes autres causes, les gaz de la combustion ont une tendance, en passant du foyer dans la boîte à fumée, à parcourir les rangées supérieures des tubes, au détriment des rangées inférieures. Cet effet est particulièrement marqué avec les chaudières munies d'une voûte en briques, les gaz se trouvant obligés, pour arriver aux tubes inférieurs, de redescendre vers le bas, ce qui est contraire à leur tendance naturelle; il augmente en outre après quelque temps de marche à mesure que les tubes inférieurs, dans lesquels le courant d'appel se fait moins sentir, se remplissent d'escarbilles et de suie. On a reconnu qu'en bouchant 15 0/0 des tubes inférieurs, on ne diminuait la production que de 1 0/0.

La diminution de la section utile de la tubulure résultant de l'abandon par les gaz des tubes inférieurs ou de l'obstruction de ces derniers, a pour effet d'augmenter la vitesse des produits de la combustion à travers les tubes des rangées supérieures et de diminuer le rendement de la chaudière aussi bien que la production totale maximum. On peut y remédier dans une certaine mesure par l'emploi de chicanes convenablement disposées dans la boîte à fumée ou d'échappements annulaires assurant une meilleure répartition du tirage sur toute la section du calorimètre.

92. Influence de la longueur des tubes sur le rendement. — On peut augmenter la surface de chauffe en allongeant les tubes ou en accroissant leur nombre. Entre certaines limites, la première solution entraîne une plus grande économie parce que l'étendue de la surface n'est pas le seul facteur que l'on doive considérer. Il est nécessaire que le parcours des gaz à l'intérieur de la chaudière soit assez long pour qu'ils aient le temps d'abandonner la plus grande partie de leur calorique. La chaudière locomotive pouvant surtout se développer en longueur, l'étude de l'influence de l'étendue des surfaces de chauffe sur le rendement peut se ramener à celle de la longueur des tubes.

Au delà d'une certaine longueur, voisine de 4,50 m., un accroissement très notable de la longueur du faisceau ne produit plus qu'une augmentation très faible de transmission et la légère amélioration de rendement qui en résulte est compensée par l'accroissement de poids et de prix de la chaudière. On ne doit pas oublier non plus que la perte par refoidissement extérieur augmente à peu près proportionnellement à la surface extérieure de la chaudière et qu'en allongeant indéfiniment les tubes, il arrive un moment où le faible accroissement de la chaleur transmise par l'augmentation de surface ne compenserait pas celui de la perte et le rendement pourrait diminuer.

Dans les limites usuelles pour les locomotives, le rendement décroît régulièrement, quand on raccourcit les tubes et d'autant plus vite qu'ils sont plus courts. MM. Henry et Baudry ont indiqué comme résultats de leurs expériences les chiffres contenus dans le tableau ci-dessous comme représentant la valeur de la réduction pour cent, quand on passe des tubes de 5 m. aux tubes de 3 m.

Tirage.	Foyer ordinaire.	Voûte longue.	Voûte courte.	Ten Brinck.
25 mm.	18	14	15	15
45 —	19	14	16	15
75 —	20	15	16	15

La réduction est de 1 0/0 plus grande environ pour le foyer ordinaire que pour les foyers munis de voûtes ou de bouilleurs, quand on passe des tubes de 5 m. à ceux de 4,50 m.; elle est de 2 0/0 plus forte, quand on passe des tubes de 5 m. à ceux de 4 m. et va ensuite en s'accélérant rapidement à partir de 4 m.

Etant donné le diamètre usuel des tubes des chaudières locomotives, les longueurs comprises entre 4 m. et 4,50 m. correspondent au maximum de production, tout en donnant un bon rendement économique. En dépassant une longueur de 4,50 m., on s'expose à perdre plus en puissance que l'on ne gagne en rendement.

Au-dessus de 4 m. on s'éloigne de la production maximum et on perd de plus en plus en rendement; en descendant jusqu'à 3 m. on diminuerait le rendement de 15 0/0.

Telles sont les conclusions auxquelles ont conduit les essais de la *Compagnie de Lyon.*

L'emploi des tubes à ailettes permet de raccourcir le faisceau tubulaire sans diminuer la puissance ou le rendement.

93. Influence de la réduction du nombre des tubes. — L'expérience montre que la quantité de combustible brûlé par unité de surface de grille et la quantité d'eau vaporisée par unité de surface de chauffe et par heure décroissent au fur et à mesure que le nombre des tubes diminue mais pas tout à fait dans la même proportion. La suppression d'une certaine fraction du faisceau tubulaire ne paraît pas avoir d'effet sensible sur le rendement mais diminue notablement la puissance totale de la chaudière, dans une proportion un peu plus faible cependant que la réduction de la surface de chauffe.

Si cependant ce sont des tubes des rangées inférieures qui sont supprimés, l'influence sur la production sera très faible, les gaz tendant à passer surtout par les tubes des rangées supérieures, particulièrement si l'échappement est placé un peu haut et si la chaudière est munie d'une voûte en briques. Nous verrons que l'on peut remédier en partie à ce défaut par l'emploi de chicanes placées dans la boîte à fumée ou d'échappements annulaires et surtout par un choix convenable de l'emplacement à donner à la tuyère d'échappement.

94. Conditions pratiques d'une bonne vaporisation. — La chaudière locomotive ne doit pas seulement être disposée en vue d'une vaporisation active; elle doit encore répondre à cette condition importante de produire de la vapeur aussi sèche que possible bien que les conditions de service auxquelles elle est soumise soient peu favorables à cet état de choses, en raison surtout des variations considérables et répétées de la puissance et de la rapidité des démarrages.

Dans une chaudière dont la prise de vapeur est fermée et où la pression se trouve établie, la surface de l'eau demeure tranquille, la tension de la vapeur empêchant l'ascension et le dégagement des bulles de vapeur. Dès que, par suite de l'ouverture du robinet de vapeur, la pression vient à diminuer dans la chambre de vapeur, le liquide entre vivement en ébullition et la vapeur se dégage, tendant à rétablir la pression correspondant à la température de l'eau. Cette ébullition cause des remous violents qui peuvent être accompagnés de projections d'eau dans le tuyau de vapeur et, de là, dans les cylindres. Cet entraînement sera d'autant plus considérable que la dépression sur la surface de l'eau aura été plus brusque et plus sensible, une plus grande quantité de vapeur se dégageant dans le même temps.

La vapeur entraîne toujours une certaine quantité d'eau que l'on évalue

ordinairement, pour les locomotives, par exemple à 5 ou 15 0/0 du poids de vapeur, et qu'il convient de distinguer des projections accidentelles. Cette eau, normalement et naturellement entraînée, se trouve très intimement mélangée à la vapeur et l'on ne possède aucun moyen mécanique de s'en débarrasser bien efficacement.

La proportion d'eau normalement entraînée est du reste variable suivant le type de chaudière, les dispositions de la prise de vapeur et la hauteur du niveau, bien que leur influence se fasse surtout sentir sur l'eau entraînée accidentellement et qui s'ajoute à la première. On peut dire néanmoins que, dans une certaine mesure, ces deux phénomènes sont intimement liés ; aussi, une chaudière sera-t-elle d'autant plus sujette à des primages accidentels qu'elle aura normalement une plus grande tendance à entraîner de l'eau.

Il ne faut pas confondre les *ébullitions* avec les *entraînements d'eau;* ceux-ci ne coexistent pas nécessairement avec les premières, mais ils en résultent aussitôt que l'intensité de ce phénomène atteint un certain degré.

L'*ébullition* n'est autre qu'une vaporisation plus ou moins tumultueuse provoquée par une diminution sensible et brusque de la pression dans la chambre de vapeur ou par une certaine viscosité de l'eau.

Nous venons de voir que le primage n'accompagne pas forcément les ébullitions, de même, les projections d'eau par la cheminée ne sont pas toujours, pour les locomotives, l'indice d'un entraînement. Ainsi, au départ, après un arrêt prolongé, la vapeur se condense en partie sur les surfaces refroidies des boîtes à tiroir et des cylindres : l'eau résultant de cette condensation est projetée en pluie par le tuyau d'échappement.

Le premier indice d'une ébullition est donné par les soubresauts et le manque de stabilité du niveau. Tantôt ce dernier subit des variations brusques et continuelles, tantôt il monte au delà de la bague supérieure du tube, aux indications duquel on ne peut plus recourir. De même, les robinets de jauge donnent alternativement de la vapeur et de l'eau.

En outre de l'incertitude des indications données par les appareils de niveau, les ébullitions ont pour effet de créer, dans les chaudières, des trépidations qui fatiguent les tôles et surtout de causer des *entraînements d'eau.*

Les inconvénients des projections d'eau sont de plusieurs genres et peuvent avoir une influence marquée sur le fonctionnement soit de la machine, soit de la chaudière.

Il va de soi que les entraînements d'eau diminuent le rendement d'une chaudière, mais dans une assez faible proportion ; ce phénomène ne se traduit en effet que par une perte d'eau chaude puisque l'eau entraînée, n'ayant pas été vaporisée, n'a pas absorbé et n'entraîne pas au dehors les calories correspondant à sa chaleur latente.

Le primage a de sérieux inconvénients pour les locomotives destinées au remorquage des trains express à long parcours, dont le tender contient la quantité d'eau strictement nécessaire pour effectuer le trajet. On conçoit qu'une perte d'eau, qui peut s'élever jusqu'à 20 0/0, n'est pas négligeable.

Un entraînement d'eau prolongé et violent peut causer une forte diminution du niveau, le ciel du foyer, lorsque l'émulsion cesse, se trouvant à découvert.

La présence d'une notable quantité d'eau dans les cylindres peut amener ce que l'on appelle des *coups d'eau ;* le liquide se trouvant renfermé, à bout de course, dans l'espace mort, occasionne souvent des ruptures et des avaries graves. Ajoutons que l'eau entraîne dans les cylindres des particules de sel ou de matière solide qui viennent rayer les surfaces.

En outre, au point de vue du rendement thermique, la présence d'une certaine quantité d'eau dans les cylindres a des inconvénients connus et qui augmentent avec le degré de détente, bien qu'à ce point de vue les machines compound présentent des avantages.

Examinons maintenant les différentes causes qui tendent à influencer la proportion d'eau entraînée, soit naturellement, soit accidentellement.

1° *Ouverture brusque du régulateur.* — C'est la cause la plus connue des entraînements d'eau et la plus facile à éviter. Elle agit comme la suivante.

2° *Diminution de la pression.* — La diminution de la pression, due à des causes autres que l'ouverture du régulateur, a des effets analogues. C'est un fait reconnu d'ailleurs que les entraînements se produisent plus fréquemment aux basses pressions ; le volume de vapeur, qui doit se dégager de l'eau pour produire un travail donné, étant plus grand, tend davantage à soulever sa surface. Aussi les chaudières modernes timbrées de 11 à 15 kg., en souffrent-elles moins que les anciennes fonctionnant à 7 ou 8 kg.

A ce point de vue, il faut éviter, comme on le sait, les coups prolongés de patinage qui amènent une ébullition violente et brusque en même temps qu'ils diminuent la pression d'une manière parfois notable.

3° *Débit irrégulier.* — Le débit irrégulier a pour effet de diminuer le temps pendant lequel le poids de vapeur nécessaire au fonctionnement de la machine doit se dégager, en outre il cause des variations brusques dans l'allure de l'ébullition. Il convient de réhabiliter à ce propos la machine compound accusée de favoriser les entraînements d'eau par la succion plus espacée des cylindres, la vapeur n'étant aspirée que deux fois par tour au

lieu de quatre. Or, la machine compound, étant plus économique, consomme moins de vapeur à puissance égale et exerce par conséquent une aspiration moindre, dans le même temps. En outre si, d'un côté, la succion n'est plus opérée que par le petit cylindre, la période d'admission y étant prolongée dans la même proportion, l'écoulement de la vapeur s'opère sensiblement avec la même continuité.

4° *Insuffisance de la chambre de vapeur.* — Le volume de la chambre de vapeur n'a pas, croyons-nous, dans les limites pratiques, l'importance que l'on est souvent porté à lui attribuer. L'influence d'un grand réservoir ne se ferait réellement sentir que si la vapeur y était comprimée à une pression beaucoup plus grande que celle à laquelle elle s'écoule dans les cylindres.

En outre, quel que volumineux que soit le dôme d'une locomotive, il n'augmente la capacité de la chambre de vapeur que dans des limites étroites. On ne peut donc invoquer à son avantage que la distance à laquelle il élève la prise de vapeur au-dessus du niveau. Or, quand une ébullition se produit dans une chaudière, l'eau entraînée ne se cantonne pas à quelques centimètres du niveau. Cette eau se mélange assez intimement à la vapeur et il se produit, dans toute la chambre, une vive émulsion qui se fait sentir presque autant à la partie supérieure du dôme qu'au niveau de l'eau : par exemple, dans certaines chaudières marines, très sujettes aux entraînements d'eau à cause de la présence de l'huile provenant du condenseur à surface, les soupapes de sûreté sont placées à plus de 2 m. du niveau; néanmoins, quand elles fusent brusquement, il n'est pas rare de voir un violent entraînement d'eau qui rejette sur le pont une grande quantité d'eau. On conçoit donc qu'un dôme de faible capacité produise dans bien des cas le même effet qu'un dôme volumineux.

Il faut en somme plutôt augmenter la hauteur que le volume d'un dôme; encore, n'est-ce souvent qu'un palliatif insuffisant, surtout si la prise de vapeur se fait en un seul point. Dans ce cas, le dôme n'empêche pas qu'il se produise souvent, au droit de la prise de vapeur, une violente succion.

A ce point de vue, on ne peut méconnaître les avantages du tuyau Crampton qui répartit la prise de vapeur sur la plus grande partie du niveau. Toutefois, il faut que la section des orifices soit bien proportionnée au débit; sans quoi, les trous les plus voisins du régulateur entrent seuls en jeu. D'autre part, les fentes du tuyau crépiné sont sujettes à se boucher et à s'entartrer.

5° *Niveau trop haut.* — La distance verticale qui sépare le niveau de la prise de vapeur a une grande influence sur les entraînements d'eau et, quand le niveau est trop haut, la diminution de cette distance se traduit par une tendance plus grande au primage. En outre, comme la chaudière est cylin-

drique, la surface de dégagement décroît à mesure que le niveau s'élève. Nous en verrons plus loin l'effet.

6° *Prise de vapeur mal située.* — Dans les chaudières locomotives, on évite généralement de prendre la vapeur au-dessus du foyer où l'ébullition est plus active qu'en tout autre point, et où, par conséquent, les projections d'eau peuvent être plus violentes.

Le primage, en cette région, est surtout dû à la présence des lames d'eau latérales où la mauvaise circulation et le dégagement par à-coups des bulles de vapeur provoquent, le long des parois de la chaudière, des projections d'eau qui peuvent pénétrer dans le dôme si ce dernier se trouve au-dessus du foyer. La pratique courante qui consiste à mettre le dôme sur le corps cylindrique, semble donc rationnelle.

7° *Mauvaise circulation.* — La manière dont s'effectue la circulation de l'eau dans la chaudière a une grande influence sur la proportion d'eau entraînée. Quand la production de vapeur est disproportionnée aux sections restées libres pour le passage des courants d'eau et de vapeur, le dégagement des bulles de vapeur ne se produit plus avec continuité. Il se forme des poches de vapeur qui ne se dégagent qu'après avoir acquis un certain volume, et produisent, au moment où elles viennent crever à la surface, une vive émulsion, favorable aux projections d'eau. Les parties d'une chaudière locomotive les plus sujettes à ce phénomène sont les lames d'eau et la plaque tubulaire du foyer.

Il s'exerce, dans les lames d'eau, une circulation très active, le courant montant suivant les parois du foyer et le courant descendant celle de l'enveloppe. Il est évident que, en raison de l'étroitesse et de la hauteur des lames d'eau, quand la chauffe est très active, les deux courants doivent se contrarier et que l'émission de la vapeur devient saccadée. La circulation est alors entravée et la densité de l'eau dans la lame d'eau subit, à de courts intervalles, des variations énormes. C'est là un mal que l'on ne pourrait éviter sans accroître, dans une large mesure, la largeur des lames d'eau, ce qui est presque impossible, ou en diminuant leur hauteur, et alors on retomberait dans les inconvénients plus graves des foyers plats.

On a quelquefois essayé de diminuer ou même de supprimer le courant descendant dans les lames d'eau en faisant communiquer leur partie inférieure avec les parties les plus froides de la chaudière, telles par exemple que le bas du corps cylindrique, au moyen d'un tuyau extérieur, ou en disposant sous la grille, comme M. Webb, une lame d'eau horizontale, réunissant les lames verticales. On a certainement accru ainsi la vaporisation des chaudières, en améliorant leur circulation, mais au prix d'une complication regrettable et d'un accroissement de poids.

8° *Surfaces de dégagement insuffisantes.* — Il est évident que le rapport de la surface libre du liquide, par où doit se faire le dégagement des bulles de vapeur, à la production de vapeur, ou, toutes choses égales d'ailleurs, à la surface de chauffe, joue, dans les phénomènes relatifs aux entraînements d'eau, un rôle prépondérant. Pour les différentes chaudières locomotives, en raison même du type adopté, le rapport est peu variable (de 1/15 à 1/20) ; mais il faut chercher à l'augmenter et proscrire tous les dispositifs qui peuvent tendre à le diminuer. Plus, en effet, la surface de dégagement sera grande, par rapport au peu de vapeur produit, et moins elle sera agitée par l'ébullition.

9° *État des surfaces.* — On a souvent constaté que les chaudières neuves entraînaient plus d'eau que les autres. Ce fait, qui peut aussi provenir de ce que l'on a laissé dans la chaudière de la graisse ou de l'huile, tient surtout à la propreté très grande des surfaces qui augmente leur conductibilité et par conséquent la violence de l'ébullition. Ce phénomène est bien connu dans la marine. Aussi l'amirauté anglaise, avant d'effectuer les essais des bâtiments neufs, recommande-t-elle de faire fonctionner la veille, pendant quelques heures les chaudières à l'eau de mer. Il se dépose alors sur les surfaces de chauffe une mince couche de sel qui diminue légèrement la conductibilité et atténue la tendance aux ébullitions.

10° *Présence de corps gras dans les chaudières.* — Une quantité, même très minime d'huile ou de graisse dans une chaudière, rend l'ébullition tumultueuse ; c'est peut-être, de toutes les causes d'entraînement d'eau que nous avons examinées, celle qui a l'action la plus marquée. Grâce au condenseur à surface, ce sont les chaudières marines qui souffrent le plus de la présence des corps gras.

De même, les entraînements d'eau sont bien plus fréquents et plus violents, dans les chaudières de torpilleurs, que dans les locomotives, malgré le volume beaucoup plus considérable de la chambre de vapeur des premières, et cela tient, comme nous venons de le dire, à l'huile entraînée hors du condenseur à surface par l'eau d'alimentation. On emploie, dans la marine, plusieurs types d'épurateurs et de dégraisseurs qui n'ont d'autre but que de débarrasser de cette huile l'eau d'alimentation. Il est juste d'ajouter que les ébullitions ne sont peut-être que les moindres inconvénients qu'entraîne la présence de l'huile dans les chaudières.

Beaucoup d'impuretés que peut contenir l'eau d'alimentation ont le même effet que l'huile, grâce surtout à ce qu'elles ont souvent une origine plus ou moins graisseuse.

Les substances désincrustantes que l'on introduit dans les chaudières ont

souvent une action marquée sur les ébullitions qu'elles déterminent parfois indépendamment de toute autre cause.

On peut, dans une certaine mesure, diminuer le rôle des entraînements d'eau, soit par l'adoption de détendeurs, soit par des moyens mécaniques bien connus, ayant pour but de séparer la vapeur d'une partie de l'eau mécaniquement entraînée. Le mieux est de prendre les précautions voulues pour que les entraînements ne se produisent pas.

La détente de la vapeur s'écoulant à travers un orifice produit une légère surchauffe, puisque la pression diminue sans perte apparente de chaleur, mais le surchauffage ainsi produit est infime. Ainsi, 1 kg. de vapeur saturée sèche à 5 atmosphères, s'écoulant à l'air libre, n'abandonne que 15 calories. Celles-ci ne peuvent vaporiser que 0,024 kg. d'eau déjà supposée à la température de la vapeur. On voit donc que l'étranglement dû au régulateur ou laminage de la vapeur dans les orifices du cylindre n'ont qu'une faible influence sur la réévaporation de l'eau entraînée, encore avons-nous supposé une chute de pression assez considérable.

En résumé, on doit s'attacher, en ce qui concerne la construction des chaudières locomotives, à assurer une bonne circulation dans toutes leurs parties, à augmenter autant que possible la surface libre du liquide et à disposer rationnellement la prise de vapeur. On ne doit pas d'ailleurs se dissimuler que la chaudière locomotive est mal disposée, par son système même, en vue d'une circulation proportionnée à l'activité de sa production.

On doit aussi recommander : une conduite régulière du feu et de l'alimentation, de manière à ne pas laisser tomber la pression ; l'ouverture progressive de la prise de vapeur ; l'introduction, pour le graissage du régulateur, dans la chaudière, du minimum d'huile possible. Il faut employer une eau aussi pure que possible pour le remplissage ou l'alimentation, et limiter l'emploi des désincrustants, dont on a souvent tendance à s'exagérer l'utilité, à ce qui est strictement nécessaire.

95. L'augmentation de la puissance absolue des locomotives revient à celle de la capacité des chaudières : il est toujours facile d'accroître à volonté le volume des cylindres et d'établir en proportion la section de tous les organes, mais l'accroissement de puissance de la chaudière est loin d'être aussi facilement réalisable quoique l'on soit encore assez loin, du moins en Europe, d'avoir atteint la limite extrême que la surélévation de plus en plus générale des chaudières a reculé bien au delà de ce qui paraissait autrefois possible.

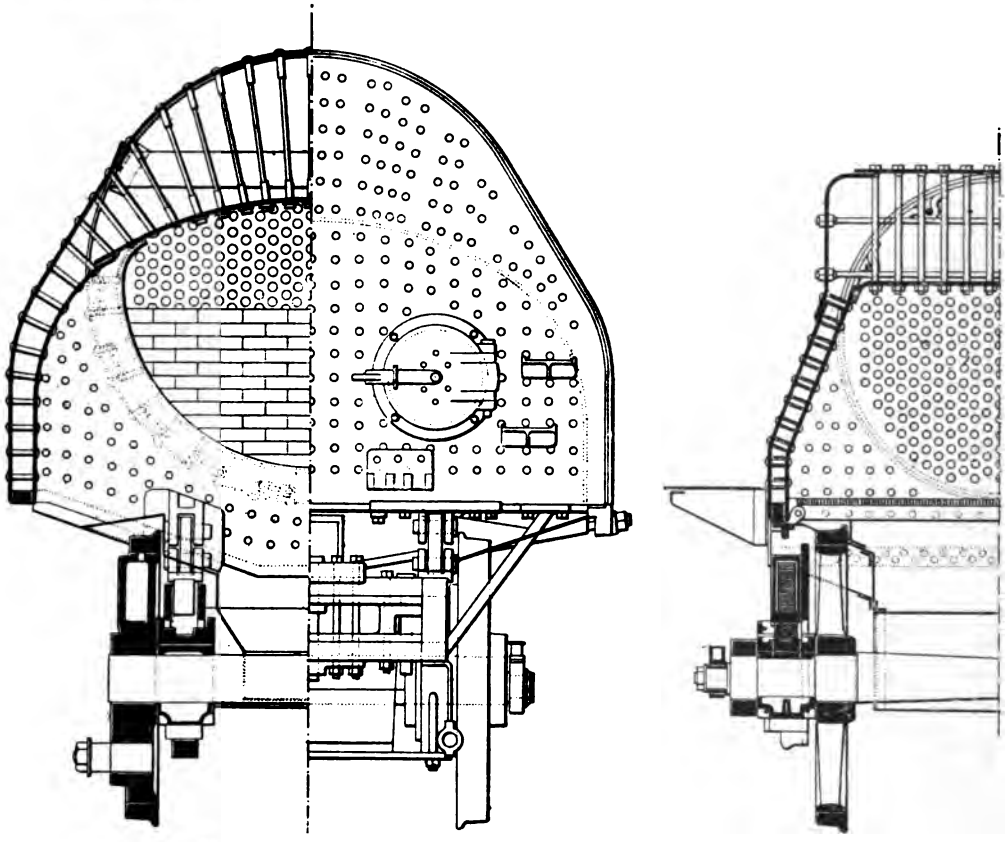
Pour accroître la puissance d'une chaudière, il faut d'abord augmenter la surface de grille, puis la surface de chauffe et enfin la section totale des

tubes ; ce qui revient à allonger ou élargir la grille et à accroître le diamètre du corps cylindrique.

Or, on ne peut indéfiniment allonger le foyer ; une longueur intérieure de 2,60 m. est une limite au delà de laquelle la chauffe devient difficile et pénible : dans quelques cas extrêmes on peut aller à 3,00 m., mais c'est une stricte limite. Il faut donc élargir la grille, si l'on se trouve dans la nécessité d'augmenter encore sa surface, et cette nécessité s'est déjà fait sentir, nous le verrons, tout au moins sur les réseaux où l'on emploie des combustibles menus ou très maigres. Or, dans les locomotives offrant les dispositions classiques, la largeur du foyer est limitée par l'écartement des longerons si ceux-ci sont intérieurs, par l'écartement intérieur des bandages si le châssis est extérieur. La largeur maximum de la grille est de 1,05 m. dans le premier cas et de 1,10 m. dans le second. On peut toutefois donner la même largeur au foyer quand le châssis est intérieur en donnant moins de profondeur à la boite à feu, en remontant la chaudière, et en plaçant le cadre du foyer au-dessus des longerons. Cette disposition est déjà réalisée dans quelques locomotives européennes et sur un très grand nombre de machines américaines. La surface de grille maximum se trouve ainsi limitée au chiffre de 3 m² environ. Pour aller plus loin dans cette voie il faut avoir recours à un artifice, appliqué il y a longtemps déjà par M. Petiet à des locomotives-tenders à huit et douze roues accouplées de la *Compagnie du Nord*, et faire passer le cadre du foyer au-dessus des roues. On peut alors donner à la grille toute la largeur que permet le gabarit, c'est-à-dire environ 2,60 m. intérieurement ; la surface de grille peut ainsi être portée à un peu plus de 7 m². Cette disposition a été appliquée par M. Belpaire à des locomotives de l'*État belge* et par M. Wootten, d'une manière plus radicale encore, aux États-Unis (fig. 269). Quand les roues sont de petit diamètre, on peut réaliser cette application sans rompre avec les anciennes traditions, ou s'arranger, dans les machines express, comme dans celles de l'*État belge*, pour placer les roues accouplées au centre, en avant du foyer ou tout moins de la portion élargie du foyer. Cette disposition n'est malheureusement pas applicable aux machines à six roues accouplées fréquemment usitées aujourd'hui pour le remorquage des trains rapides et lourds. Les Américains, avec leur audace accoutumée, n'ont pas craint de remonter assez la chaudière pour permettre au foyer, d'ailleurs très aplati, de déborder de chaque côté au-dessus de roues motrices ayant jusqu'à 2,00 m. de diamètre.

Cela correspond à une hauteur du corps cylindrique de 2,70 m. environ au-dessus du rail, à laquelle les mêmes ingénieurs sont parvenus d'autre part pour donner aux foyers destinées à la combustion des houilles bitumineuses une profondeur suffisante tout en plaçant leur cadre au-dessus des longerons. Les foyers débordant au-dessus des roues de grand diamètre ont forcément

une profondeur insuffisante pour brûler d'autres combustibles que des charbons menus très maigres et surtout des anthracites ; mais, en reportant les roues motrices au milieu, et en disposant à l'arrière de la machine une paire de roues porteuses, on peut élargir le foyer en le faisant passer au-dessus de ces roues sans que l'axe du corps cylindrique se trouve reporté à une hauteur excessive. C'est la solution que la maison Baldwin a adoptée pour un certain



Disposition américaine ; foyer Wootten. Disposition de l'État belge ; foyer Belpaire.

Fig. 269. — Foyers élargis débordant les roues. Les deux figures sont à la même échelle.

nombre de machines très puissantes appelées à brûler des charbons bitumineux. On peut ainsi, sans forcer aucune des dimensions de la machine, obtenir une surface de grille de 4 à 5 m. q. Or une grille de 4,50 m² de surface, sur laquelle on brûlerait un bon charbon demi-gras pourrait produire normalement, avec le tirage ordinaire de locomotives, une puissance indiquée sur les pistons 1 400 à 1 600 chevaux. La chauffe serait évidemment pénible sur une telle locomotive et nécessiterait sans doute l'emploi de deux chauffeurs, mais enfin le problème semble de ce côté susceptible d'une solution future.

De même, en relevant suffisamment l'axe de la chaudière, on peut donner au corps cylindrique le diamètre voulu pour loger autant de tubes qu'il est nécessaire, ce diamètre n'étant plus limité par l'écartement des bandages des roues motrices et accouplées et les machines express se trouvant ainsi dans les mêmes conditions que les locomotives à marchandises à petites roues. Avec des roues de 2,00 m. il suffit de placer l'axe de la chaudière à une hauteur de 2,50 m. environ au-dessus des rails pour qu'il soit possible de porter le diamètre du corps cylindrique à 1,50 m., cote supérieure à celle que l'on peut relever sur aucune de nos machines à grande vitesse et qui semble bien suffisante pour permettre un notable accroissement de puissance. En portant, comme certains constructeurs américains, l'axe de la chaudière à 2,70 m., le diamètre du corps cylindrique devient entièrement indépendant de l'écartement des bandages, même si les roues motrices ont plus de 2,00 m. de diamètre et on peut lui donner toute valeur que l'on jugera nécessaire.

Nous verrons, dans un autre chapitre, que la surélévation du centre de gravité qui peut résulter de celle de la chaudière n'a pas d'inconvénient d'autre part dans les limites indiquées.

Dans le chapitre consacré à l'étude de l'utilisation des locomotives, nous avons appelé l'attention sur la plus grande légèreté et sur la capacité très supérieure, à égalité de poids, des chaudières multitubulaires qui ont remplacé rapidement celle du type locomotive à bord des torpilleurs. Nous ne voulons pas établir, entre deux services si différents, plus d'analogie qu'il ne faudrait et nous n'oublions pas que la chaudière locomotive a dû subir, pour se loger à bord de bâtiments à faible creux, des modifications peu heureuses de ses proportions, en grande partie responsables du peu de satisfaction qu'ont donnée ces chaudières à la mer. Toutefois, on aurait tort de ne pas accorder quelque importance à ces faits. Il se peut que, dans un avenir, peut-être assez proche, l'ingénieur ne trouve dans la chaudière multitubulaire dérivée du type du Temple, soit employée seule, soit combinée avec l'emploi d'un corps cylindrique ordinaire, un auxiliaire précieux pour augmenter la puissances des locomotives sans accroître leur poids.

96. Conclusions sur la capacité de production et l'utilisation économique de la chaudière locomotive. — Les chaudières locomotives étant, suivant les contrées ou les Compagnies, la nature du service ou le genre de combustible employé, très différemment proportionnées ou conduites, il est assez difficile de résumer en quelques chiffres absolus leur capacité et leur utilisation. Ainsi dans les machines à grands foyers destinés à brûler des menus ou des houilles très maigres, la combustion est relativement peu active tandis que la vaporisation par unité de surface de chauffe est considérable à cause de la très

grande proportion de surface directe. Les chaudières à foyer relativement petit, où le combustible est brûlé en couche épaisse, consommeront plus de combustible par unité de surface de grille, mais produiront moins en moyenne par mètre carré de surface de chauffe en raison de la plus grande proportion de surface indirecte. Seule l'utilisation, exprimée par le chiffre de vaporisation correspondant à l'unité de poids de combustible consommé, devrait être la même pour toutes les machines; il n'en est pas ainsi dans la réalité parce que la combustion n'est pas également poussée dans toutes les machines, que toutes les chaudières ne sont pas également bien proportionnées en vue du service qu'elles ont à accomplir et qu'elles ne brûlent pas des charbons de même qualité. En outre, les chiffres obtenus ne sont pas toujours bien comparables parce que l'on n'a pas, dans la plupart des expériences, déterminé la quantité d'eau entraînée qui est éminemment variable suivant les conditions du fonctionnement et l'activité de la vaporisation.

On peut admettre en moyenne, d'après un très grand nombre d'expériences, que les chaudières locomotives ordinairement proportionnées peuvent brûler en service de 400 à 500 kg. de charbon par surface de grille et par heure et produire de 40 à 50 kg. de vapeur par m² de surface de chauffe dans le même temps. Ces chiffres, qui correspondent déjà à une allure assez forcée, sont parfois dépassés en Angleterre et aux Etats-Unis où la combustion s'élève jusqu'à 800 kg. de charbon par mètre carré de grille et la vaporisation à 65 ou 70 kg. par mètre carré de surface de chauffe.

Dans les machines à grille très vaste, comme celles de l'*Etat belge* et quelques locomotives américaines à foyer Wootten, la combustion ne dépasse pas 250 à 270 kg. par mètre carré de grille et par heure, mais le rapport de la surface de chauffe à la surface de grille n'étant que de 20 à 25, la vaporisation par mètre carré de surface de chauffe et par heure s'élève à 90 et 100 kg.

Dans les locomotives bien proportionnées, la température à l'intérieur de la boîte à fumée ne dépasse pas 400° et reste ordinairement voisine de 350°. Lorsque l'allure du feu est modérée (environ 250 kg. par mètre carré de grille) la température peut s'abaisser à 300°.

Le rendement des chaudières locomotives varie suivant la longueur des tubes et l'activité du tirage. Dans les circonstances les plus favorables, avec des tubes de 4,50 m. à 5,00 m. et un tirage de 25 à 30 mm. seulement, il atteint de 0,78 à 0,80; les tubes conservant la même longueur, mais le tirage étant poussé à 100 mm., ce qui correspond, selon que le foyer comporte ou non une voûte en briques, à une combustion de 350 à 450 kg. de charbon par heure et par mètre carré de grille, le rendement descend à 0,70 m. environ. Avec des tubes de 3,30 m. à 4,50 m. le rendement varie, dans les limites extrêmes de la combustion usitées en service, de 0,50 à 0,65. L'emploi des tubes Serve

semble permettre sensiblement d'obtenir le même rendement avec des tubes de 3,00 m. à 3,50 m. seulement de longueur qu'avec les tubes lisses de 5,00 m.

La vaporisation par kilogramme de charbon varie naturellement comme le rendement et suivant la qualité du combustible employé ou la proportion d'eau entraînée ; elle est comprise entre 7 et 10 kg. ; en moyenne, elle est de 8 kg. ; mais, en pratique, on compte sur une vaporisation de 7 kg. qui est plutôt au-dessous de la vérité.

CHAPITRE II

ÉTUDE DES PERTES QUI SE PRODUISENT A L'INTÉRIEUR DES CYLINDRES

et des perfectionnements apportés à la locomotive en vue de réduire sa consommation de vapeur.

APPLICATION DE L'ENVELOPPE DE VAPEUR, DE LA SURCHAUFFE, DES DISTRIBUTIONS PERFECTIONNÉES ET DU MODE COMPOUND

Rendement thermodynamique et thermique de la machine à vapeur. — Pertes internes et externes. — Moyens propres à les atténuer. — Accroissement du degré de détente et amélioration des conditions physiques dans lesquelles elle s'opère. — Compression. — Enveloppe de vapeur. — Surchauffe. — Distributions perfectionnées. — Systèmes Strong, Bonnefond, Durant et Lencauchez. — Système compound. — Ses avantages en général. — Historique succinct de son application à la locomotive. — Ses avantages et ses inconvénients pour cette application spéciale. — Types de locomotives auxquels il convient surtout d'appliquer le mode compound. — Comparaison des différents modes d'application du système compound aux locomotives : machines à deux, trois et quatre cylindres. — Réglage des introductions. — Rapport de volume des cylindres. — Volume du réservoir intermédiaire. — Calage et séquence des manivelles. — Dispositifs adoptés pour le démarrage. — Comparaison des différents types de locomotive compound au point de vue des efforts exercés au démarrage. — Changements de marche. — Résultats économiques donnés par l'application du système compound aux locomotives. — Résumé des avantages et des inconvénients du mode compound appliqué aux locomotives. — Description des principaux systèmes adoptés pour l'application du mode compound aux locomotives. — Comparaison entre le mode compound et la simple expansion opérée à l'aide d'une distribution perfectionnée, dans leur application à la locomotive. — Conclusions générales.

RENDEMENT THERMODYNAMIQUE DE LA MACHINE A VAPEUR ET PERTES AUXQUELLES ELLE EST SOUMISE

97. Rendement thermodynamique de la locomotive. — La thermodynamique nous apprend que le rendement de toute machine thermique, dans laquelle le fluide évolue suivant le cycle Carnot, est donné par la relation $\frac{T - t}{273 + T}$ où les températures initiale et finale du fluide, T et t, sont exprimées en degrés centigrades. Cette formule, qui résume sous une forme aussi simple que possible une des principales lois qui régissent, au point de vue thermo-

dynamique, le fonctionnement des moteurs thermiques, revient à dire que le rendement thermodynamique d'une machine à vapeur idéale augmente avec la différence des températures de la vapeur à son entrée et à sa sortie du cylindre : la vapeur étant supposée, dans l'espèce, assimilable à un gaz parfait.

La température finale, qui est celle du condenseur ou de l'atmosphère, suivant que la machine est ou non à condensation, étant sensiblement la même pour les appareils du même genre, il faut, pour améliorer le rendement, accroître le plus possible la température initiale, ou, ce qui revient au même pour la vapeur saturée, la pression de la vapeur employée. Toutefois, au delà d'une certaine limite, atteinte aujourd'hui dans quelques applications, le rendement de la machine à vapeur ne croît plus que lentement avec les pressions, parce que les températures de la vapeur à haute tension n'augmentent pas, tant s'en faut, dans le même rapport que les pressions. Ainsi, pour une machine à condensation, le rendement termodynamique ne passe que de 0,176 à 0,197 quand la pression initiale passe de 12 à 16 atmosphères. Théoriquement, le condenseur est plus avantageux puisqu'une différence de contrepression sous le piston, de 0,9 kg. environ, produite par son emploi augmente l'écart de température de 46° environ et accroît le rendement théorique de 39 0/0 pour des machines fonctionnant à une pression initiale de 8 kg. Malheureusement, il n'en est pas de même en pratique et la machine à condensation est, à certains points de vue, plus imparfaite que la machine sans condensation, de sorte que l'on ne recueille qu'une faible partie de cet excès de travail théoriquement utilisable. Nous n'avons pas ici, du reste, à nous occuper de cette question.

Voyons maintenant dans quelle mesure le rendement se modifie avec l'élévation de la pression.

Pour une pression de régime de 5 kg. (absolus) le rendement théorique ressort à

$$R = \frac{151 - 106}{273 + 151} = 0{,}106$$

pour les machines sans condensation.

Avec une pression de 7 kg. (absolus) on a :

$$R = \frac{164 - 106}{273 + 164} = 0{,}131$$

soit un bénéfice de 16,6 0/0.

Pour des pressions de 12 kg. et de 15 kg. (absolus), le rendement théorique s'élève respectivement à

$$R = \frac{187 - 106}{273 + 187} = 0{,}176$$

$$R = \frac{197 - 106}{273 + 197} = 0{,}193$$

soit un bénéfice de 37,4 0/0 dans le premier cas et de 44,1 0/0 dans le second, par rapport au rendement correspondant à la pression de 5 atmosphères.

On voit l'avantage économique considérable que présente l'emploi des hautes pressions qui permettent, en outre, dans la locomotive, d'accroître l'effort de traction sans que l'on ait à changer le volume des cylindres et surtout d'augmenter la réserve d'énergie emmagasinée dans la chaudière d'où résulte une conduite plus facile de la machine surtout à la montée des rampes et chaque fois qu'il est nécessaire de donner *un coup de collier.*

Mais, pour que l'élévation du timbre soit profitable dans toute la mesure du possible, il est nécessaire que la détente de la vapeur suive une marche ascendante proportionnée, ce qui est très difficile à réaliser, nous le verrons ailleurs, dans un cylindre unique avec les distributions ordinaires par tiroir et, surtout, que cette expansion se produise dans des conditions physiques capables d'assurer son efficacité.

98. Pertes qui se produisent dans les cylindres des machines à vapeur. — S'il était possible de construire une machine à vapeur dont la théorie reste entièrement thermodynamique et dans laquelle la perte d'énergie correspondrait simplement à celle qui nous est indiquée par la thermodynamique, cette théorie serait d'une grande simplicité et présenterait toutes les garanties d'exactitude, sans que l'on soit contraint de recourir à l'expérience pratique pour en étudier les variations. L'utilisation totale de la machine et les quantités absolues d'énergie calorifique, de vapeur et de combustible nécessaires, *seraient simplement fonction des propriétés physiques de la vapeur, de sa température et du rapport de détente adopté.* L'ingénieur n'aurait plus à se préoccuper que de la quantité totale de chaleur cédée à la machine et des températures initiale et finale du fluide dans le cylindre. Il importerait peu alors que la machine soit avec ou sans enveloppe, monocylindre ou à détente fractionnée en un aussi grand nombre d'expansions qu'on le désirait. En réalité, dans une telle machine, les rendements *thermodynamiques, thermiques et dynamiques* se confondraient en une seule utilisation facile à calculer.

Toutefois, il n'en est rien en pratique et l'expérience nous montre que l'utilisation des machines réelles diffère largement de celles des machines idéales supposées posséder des cylindres non conducteurs de la chaleur et que c'est surtout à l'écart existant entre les deux rendements qu'est due l'utilisation variable des moteurs à vapeur, suivant leur type ou le mode de fonctionnement adopté.

La perte thermodymanique inévitable, celle qui persiste dans tout moteur thermique, quel que soit le fluide employé, est rarement, dans la machine à vapeur, inférieure à 80 0/0 de la quantité totale d'énergie mise en œuvre.

Quant aux pertes thermiques, qui viennent immédiatement après par ordre d'importance, elles varient depuis 15 0/0 dans les meilleurs appareils, à 60 0/0 et plus dans les machines moins perfectionnées, de l'énergie thermodynamiquement utilisable.

De ces pertes qui se produisent, soit dans le cylindre lui-même, soit en dehors de lui, les unes, que nous n'avons pas à considérer ici, sont inévitables, tandis que d'autres au contraire sont susceptibles de réductions. Les pertes réductibles, les seules que nous ayons à envisager ici sont les pertes par détente incomplète et excès de contre-pression, par rayonnement, convection et conductibilité, extérieure et intérieure.

On peut remédier aux pertes par détente incomplète et excès de contre-pression en améliorant les distributions ; nous verrons plus loin quelques exemples intéressants des tentatives effectuées récemment dans ce but.

99. Pertes externes. — Les pertes extérieures par rayonnement peuvent avoir une certaine importance particulièrement pour les locomotives qui ne sont pas protégées des intempéries et dont les cylindres sont exposés au violent courant d'air causé par le déplacement rapide de la machine dans l'atmosphère. On y remédie en les entourant d'une enveloppe mauvaise conductrice. Quelques ingénieurs ont proposé l'emploi de la chemise de vapeur dont nous parlons plus loin, mais comme nous le dirons, elle ne paraît pas entraîner des avantages capables de contrebalancer la complication et l'excédent de poids qu'elle entraîne. Le meilleur procédé consiste encore à placer les cylindres à l'intérieur du châssis, surtout si on les dispose, comme dans les machines anglaises, de manière à former la base de la boîte à fumée; ils sont alors notablement réchauffés par les gaz qui traversent cette dernière et il y a là un bénéfice réel à recueillir. Si même les cylindres intérieurs restent en dehors de la boîte à fumée, ils sont protégés en partie du courant d'air et, comme tels, soumis à des pertes par convection un peu plus faibles.

100. Pertes internes. — C'est un fait depuis très longtemps reconnu que l'utilisation d'une machine à vapeur n'augmente pas, comme on pourrait le croire, indéfiniment, lorsque l'on accroît la pression initiale et le degré de détente. C'est donc qu'une perte importante vient contrebalancer, et au delà, le bénéfice dû à l'amélioration du rendement idéal, perte dont on attribue en toute certitude aujourd'hui la production aux *condensations initiales* et aux réévaporations pendant la détente et l'échappement qui en sont le corollaire.

Des expériences précises, effectuées depuis une quinzaine d'années, ont démontré que, *pour chaque pression, il existe un rapport de détente déterminé,*

assez peu élevé, pour lequel l'utilisation réelle du fluide est maximum, et, en outre, qu'il existe *pour les machines monocylindres une pression maximum variable suivant que le fonctionnement a lieu avec ou sans condensation, au-delà de laquelle la consommation de vapeur ne cesse d'augmenter*[1].

C'est aussi ce que vérifie la pratique courante.

D'autre part, l'analyse des phénomènes qui se passent à l'intérieur de la machine à vapeur a montré que le rendement réel s'écartait, dans une très large mesure, du rendement de la machine thermodynamiquement parfaite sans que cet écart puisse être attribué à des pertes extérieures.

Si l'on compare le volume de vapeur sortant d'un cylindre au volume de vapeur, supposée sèche et à la pression finale, correspondant au poids d'eau d'alimentation dépensé, en tenant compte de ce qu'a pu fournir l'enveloppe de vapeur, quand il y en a une, on trouve invariablement que la première quantité est notablement inférieure à la seconde ; il en résulte que la vapeur, s'échappant à la fin de la course, doit contenir une assez grande quantité d'eau, dont une partie se réévaporise pendant l'échappement, l'autre restant à l'état vésiculaire. Ce phénomène provient bien en partie des fuites autour du piston et de ce que la vapeur, fournie par la chaudière, est rarement sèche, mais la différence constatée est trop considérable pour être uniquement attribuable à ces causes secondaires. On est alors amené à cette conclusion qu'une partie de la vapeur, fournie par le générateur, doit se liquéfier à son entrée au cylindre, pendant la période d'admission.

Ce fait est encore prouvé par la différence existant entre la consommation réelle de vapeur et celle qui correspond au diagramme d'indicateur. Ce dernier ne donne en effet que le poids de vapeur sensible, présent au cylindre. D'ailleurs les courbes d'indicateur montrent, d'une manière certaine, qu'il se produit généralement vers la fin de la détente, une réévaporation sensible.

Les pertes internes étant beaucoup plus importantes que les autres dont une construction soignée et rationnelle permet déjà de diminuer l'influence, on ne doit pas s'étonner de ce que l'attention des ingénieurs se soit, depuis quelques années, portée de ce côté.

Les phénomènes qui en déterminent la production sont, en apparence tout au moins, d'une grande simplicité et se prêtent à une analyse facile.

101. Condensations initiales à l'intérieur des cylindres. — La vapeur d'admission, à son entrée au cylindre, vient en contact avec des parois dont la température est notablement inférieure à la sienne ; elle se condense donc en partie pour échauffer ces parois. Or, pendant la détente, et au cours de

M. Delafond, *Annales des Mines*.

l'échappement, la pression à l'intérieur du cylindre diminuant progressivement, cette eau, résultant de la condensation et déposée sur les parois sous forme de rosée, se vaporise, mais aux dépens de la chaleur précédemment fournie aux parois qui retombent à la température qu'elles avaient au début, et ainsi de suite. Nouvelle admission, nouvelle condensation, etc. En outre, une partie de cette eau peut ne pas se vaporiser pendant l'échappement, reste enfermée au cylindre, à la même température que les parois et joue le même rôle qu'eux. Elle absorbe, grâce à sa grande chaleur spécifique, une forte proportion de calorique, au moment de l'admission, en entraînant également, de son côté, des condensations initiales. Celles-ci peuvent même augmenter à chaque coup de piston, l'eau s'accumulant au cylindre et ne pouvant se vaporiser entièrement pendant la détente et l'échappement. L'équilibre finit par s'établir lorsque la perte a atteint une valeur déterminée, souvent très considérable; elle n'est plus limitée que par l'insuffisance de la réévaporation pendant l'échappement qui ne permet pas le refroidissement suffisant de cette eau. On voit déjà l'influence que peut avoir de ce côté, sur la production de ces phénomènes, la vitesse du piston.

Il est évident à priori, et l'expérience le démontre, que l'importance de ces phénomènes est d'autant plus grande que l'écart total des températures pendant la détente est plus considérable, que la vitesse et la contre-pression sont plus faibles, les surfaces meilleures conductrices de la chaleur et, jusqu'à un certain point, la vapeur plus humide. Une partie de ces conditions dépend *de la machine elle-même*, l'autre de l'*état du fluide*.

On peut dire, en résumé, que l'utilisation d'une machine à vapeur est une fonction déterminée de la différence entre les température initiale et finale au cylindre, de l'étendue des surfaces exposées aux variations de température et de la vitesse de piston. Or, la différence de température est une fonction variable des pressions et de la vitesse de piston; de même, la vitesse détermine le temps alloué à la production du phénomène, et l'étendue des surfaces exposées aux écarts de température est une fonction définie du volume engendré par unité de poids de vapeur et des proportions du cylindre. Toutes ces conditions sont donc dans une étroite dépendance mutuelle.

La vapeur est un fluide bien autrement bon conducteur de la chaleur que les gaz permanents et sa chaleur spécifique est beauconp plus considérable, ce qui tend à faciliter, dans une large mesure, les échanges successifs de calorique entre le fluide moteur et les parois du cylindre, et inversement.

En outre, la vapeur n'est jamais parfaitement sèche et son degré d'humidité est sujet à des variations rapides et importantes.

La condensation de la vapeur sur les parois et le refroidissement qui en

résulte, par suite de réévaporation pendant la détente, se trouvent encore augmentés de ce fait, signalé depuis longtemps par Rankine et Clausius, qu'une portion de la vapeur doit, dans la détente adiabatique, se condenser en dégageant la quantité de calorique correspondant au travail mécanique alors développé. L'eau qui résulte de cette condensation vient encore augmenter l'effet des parois en entraînant, pendant la période d'échappement, un refroidissement d'autant plus grand, par sa propre réévaporation.

Les surfaces affectées par les échanges calorifiques à l'intérieur du cylindre n'ont pas toutes la même activité ni la même influence pour la production des pertes. Les parties dont l'action est la plus énergique sont : les fonds, les surfaces du piston, celles des conduits de vapeur et de la portion de cylindre qui constitue l'espace nuisible, lesquelles sont exposées à l'écart entier de température, depuis celle qui correspond à la pression initiale jusqu'à celle qui règne au condenseur. La perte est, au contraire, minimum pour les parties qui constituent le milieu du cylindre où cet écart est le plus faible.

L'importance des condensations initiales a été constatée à la suite de nombreuses expériences effectuées depuis quelques années. On en trouvera les résultats dans les ouvrages de Hirn, de Ledieu, d'Isherwood, d'English, de Thurston et de beaucoup d'autres expérimentateurs.

La valeur absolue des condensations initiales est souvent élevée, et l'on a trouvé que, grâce à l'action alternative des échanges calorifiques, la cession ou l'absorption de chaleur par les parois du cylindre était presque douze fois plus grande qu'à travers les surfaces de chauffe d'une chaudière à vapeur pour laquelle l'écoulement de chaleur a toujours lieu dans le même sens. On a relevé, dans des machines monocylindres, fonctionnant dans des conditions défavorables, des condensations initiales dépassant 50 p. 100 de la quantité totale de vapeur dépensée.

Dans la même machine, nous l'avons dit, ces condensations varient suivant la pression de régime, la vitesse du piston et le degré de détente. Nous résumerons, pour fixer les idées à ce sujet, quelques-uns des principaux faits d'expériences, qui ont permis de passer des conjectures aux certitudes.

Les premières expériences méthodiques effectuées en vue de mesurer l'importance des condensations intérieures et les lois de leurs variations dans les machines à vapeur ont été effectuées en Angleterre en 1850 sur des locomotives et sont relatées dans l'ouvrage de Colburn et Clark. Elles ont très nettement montré que ces condensations croissent régulièrement avec le degré de détente, surtout au delà d'une certaine limite :

INTRODUCTION en centièmes.	TIMBRE	CONDENSATION en centième du poids de la vapeur réellement consommée.
75 p. 100.	5 kilogr.	11 p. 100.
60 —	5 —	11 —
50 —	5 —	11 —
40 —	5 —	17 —
30 —	5 —	24 —
20 —	5 —	32 —
12 —	5 —	42 —

M. Clark déduisait de ces expériences que l'on ne devait pas avoir intérêt à opérer dans les cylindres des locomotives une introduction inférieure aux 0,50 de la course, ce qui est un peu exagéré, car, au delà, pendant une certaine période, on gagne un peu plus par l'accroissement de la détente qu'on ne perd par condensation. En tous cas. il semble bien probable que, pour les pressions plus élevées usitées aujourd'hui, on ne gagne pas grand' chose à marcher avec une introduction fictive inférieure à 0,25 ; au delà, nous sommes porté à croire que les pertes l'emportent sur le gain.

Pour montrer jusqu'à quel point les condensations initiales sont affectées par l'étendue de la détente, nous ne pouvons mieux faire que de citer les résultats récemment obtenus en Amérique, par MM. Gately et Kletsch sur une machine monocylindre sans enveloppe :

Admission	0,589	Condensations intérieures. . .	= 22,73 0/0
— . . .	0,443	— — . . .	= 27,08
— . . .	0,330	— — . . .	= 33,87
—	0,131	— — . . .	= 50,07

Le tableau suivant, résumé d'après M. Delafond, et relatif aux essais effectués au Creusot, en 1884, sur une machine Corliss, nous fournit des documents intéressants :

PRESSIONS de marche.	ADMISSIONS	CONDENSATIONS INITIALES	OBSERVATIONS
Kilogr.	P. 100.	P. 100.	
7,75	0,040	53	Ces chiffres correspondent à la marche à condensation sans enveloppe.
»	0,125	39	
6,25	0,075	43	
»	0,105	35	
»	0,180	36	
4,50	0,059	39	
»	6,155	24	
»	0,250	13	
3,50	0,060	43	
»	0,150	25	
»	0,290	14	
2,50	0,182	31	
»	0,567	7	
»	Pleine admission.	0	

Pour un même rapport de détente, les condensations initiales semblent n'augmenter que lentement avec les pressions d'admission, Dans les expériences américaines citées plus haut, on n'a constaté, pour des pressions de 5,7 kg. et de 10,6 kg., qu'une différence de 6 p. 100 dans les condensations intérieures.

La vitesse a une influence beaucoup plus sensible. Les essais de MM. Gately et Kletsch ont donné les résultats suivants :

Nombre de tours par minute.	Condensation pour cent.
63	24,40
50	28,75
34	33,50

Ces expériences, et beaucoup d'autres non moins convaincantes, montrent que les condensations intérieures augmentent avec la pression initiale, mais surtout avec le rapport de détente et diminuent à mesure que la vitesse de piston s'accroît. Le régime le plus économique correspond donc à un degré de détente très inférieur à celui qu'indique la théorie.

On ne doit pas considérer l'action des condensations initiales sans séparer l'effet des parois de celui des eaux de condensation présentes au cylindre à la fin de l'échappement et dont nous n'avons fait jusqu'ici que mentionner l'importance. Sans discuter à fond cette question, il nous paraît utile de lui consacrer quelques lignes.

L'eau contenue dans le cylindre au commencement de l'échappement, se compose, on le sait : de l'eau entraînée et provenant des condensations initiales, non réévaporée pendant la détente; de l'eau vésiculaire résultant des condensations au cours de la détente,

La quantité qui en reste dans le cylindre après l'échappement, est moindre grâce aux réévaporations à la fin de la détente et pendant l'échappement; elle peut même être nulle. Dans ce cas, nous n'avons pas à nous en préoccuper, la seule perte subsistant étant due à l'effet des parois. Ce cas se présentera seulement d'ailleurs quand la vapeur d'admission sera absolument sèche et quand la détente ne sera pas très prolongée.

Toutefois, on est conduit à penser que, dans la majeure partie des cas, les condensations l'emportent sur les réévaporations et que les parois sont, après l'échappement, recouvertes d'une mince couche d'eau qui empêche leur contact direct avec la vapeur d'admission.

Dans l'hypothèse où cette couche liquide reste adhérente aux parois, l'effet produit est le même que si les surfaces du cylindre étaient composées d'une substance mauvaise conductrice de la chaleur, la conductibilité de l'eau étant cent fois moindre que celle de la fonte.

En pareil cas donc, la présence de l'eau dans le cylindre n'implique pas une augmentation des condensations intérieures, au contraire.

Il n'en est pas toujours ainsi en pratique. L'eau, dès qu'elle est un peu abondante dans le cylindre, vient s'accumuler à la partie inférieure de ce dernier et, au moment de l'admission, elle est, par le mouvement du piston, projetée violemment dans les espaces morts, dans un état de division qui peut être extrême. Ayant été refroidie pendant l'échappement par la réévaporation; cette eau vient s'ajouter à l'effet des parois et dans une proportion d'autant plus considérable qu'elle est en plus grande quantité et plus divisée.

AMÉLIORATION DU RÉGIME ÉCONOMIQUE DES LOCOMOTIVES

102. On a cherché à accroître l'utilisation du calorique dans les locomotives par deux genres de procédés, distincts en apparence, ayant pour objet, les uns d'*augmenter le rapport de détente*, les autres d'*améliorer les conditions* suivant lesquelles *s'opère cette détente*. Toutefois, si on y regarde de près, on verra que les seconds concourent en réalité au même but puisqu'ils sont adoptés en vue de créer des conditions rendant possible et profitable l'augmentation du degré de détente. Ils n'ont de valeur qu'autant que cette détente est poussée suffisamment loin.

Le premier de ces procédés consiste à améliorer la distribution en la disposant de manière à permettre couramment l'usage d'une détente plus prolongée qu'il n'est possible avec les distributions ordinaires par tiroirs. Les seconds ont pour effet de réduire l'action des parois et de rendre plus efficace l'effet d'une expansion prolongée. Un d'eux, le système *compound*, appartient à vrai dire aux deux catégories et offre le moyen, tout à la fois, d'*accroître la détente* et de l'*opérer dans des conditions plus avantageuses*.

Ces différents procédés employés dans la pratique ou simplement à titre d'essai sont : la *compression*, l'*enveloppe de vapeur* ou la *surchauffe*, l'emploi de distribution perfectionnées, enfin le *mode compound*. Nous les examinerons successivement en discutant leurs avantages ou leurs inconvénients. On ne peut évidemment ranger parmi eux celui qui résulte de l'accroissement de vitesse du piston, laquelle résulte de considérations d'un tout autre ordre ayant trait à l'établissement de la machine. L'influence, sur les pertes que nous envisageons, de la vitesse de piston n'en est pas moins très grande. Les changements de température des parois ou les condensations ne se produisent pas instantanément; plus la vitesse du piston est faible; plus les parois se refroidissent pendant l'échappement et s'échauffent au cours de l'admission, plus par conséquent le pouvoir condensant se trouve élevé, et plus la condensation à le temps de se produire. Quand cette vitesse est au contraire

très grande, les parois du cylindre n'ont plus le temps de passer par les écarts extrêmes de température, ils oscillent autour d'une température moyenne; si la vitesse était infiniment grande, la température des parois resterait constante.

I

COMPRESSION, ENVELOPPE DE VAPEUR, SURCHAUFFE

103. Compression. — La compression a une triple action très marquée qui a pour résultat d'améliorer le fonctionnement et de réduire les pertes internes.

D'abord elle a pour résultat d'annuler ou tout au moins de réduire l'influence des espaces morts puisqu'elle ne peut se produire qu'autant que ceux-ci sont remplis de vapeur à une pression plus ou moins élevée. Lorsque cette pression, à la fin de la période de refoulement, égale celle de la chaudière, la perte due aux espaces morts est entièrement supprimée.

Ensuite, elle atténue l'action des forces perturbatrices dues à l'inertie des organes animés du mouvement alternatif.

Enfin, au point de vue thermique, elle possède un avantage certain et reconnu. La chaleur dégagée à la fin de la course par la compression de la vapeur dans les espaces morts a pour effet de réchauffer les fonds du cylindre, le piston et les conduits de vapeur qui sont, on le sait, les parties les plus actives des parois pour la création des condensations initiales. Ce procédé est d'autant plus efficace pour réduire les pertes internes qu'il agit directement *sur la surface même des parois* venant en contact avec la valeur d'admission, et non, comme l'enveloppe, avec leur partie extérieure.

On voit donc que l'on a intérêt, dans la locomotive, à opérer une compression suffisante, ce qui se produit toujours avec les coulisses ordinaires aux crans usuels de marche. La compression ne doit pas dépasser la pression à la chaudière, sans quoi les tiroirs seraient soulevés, d'où des claquements et des chocs et il y aurait production d'un travail résistant pouvant gêner la marche ou vitesse.

104. Enveloppe de vapeur. — L'application de l'enveloppe de vapeur date de l'origine même de la vapeur et Watt lui-même, qui paraît en avoir compris les effets généraux, en recommandait l'emploi.

Dans la pratique moderne, l'enveloppe de vapeur apparaît comme le complément indispensable des machines fixes monocylindres. On en retrouve également l'application fréquente, sur des appareils compound.

Le bénéfice résultant de l'emploi de l'enveloppe de vapeur provient de la

réduction des condensations initiales à l'intérieur du cylindre. Une partie au moins de la perte de calorique qui résulte du refroidissement des parois ne donne plus lieu qu'à des condensations dans l'enveleppe où elle n'entraîne pas d'autre perte ultérieure, au lieu de se produire à l'intérieur du cylindre où elle occasionnerait des pertes de chaleur supplémentaires hors de toute proportion avec sa valeur propre.

On peut dire aussi, sous une autre forme, que l'avantage de l'enveloppe consiste à empêcher l'absorption de chaleur, empruntée à la vapeur d'admission par les parois, pendant la période d'introduction et que *son rôle utile est toujours terminé à la fin de cette dernière*, bien que l'importance même de ce rôle soit proportionné au degré de détente.

Comme l'a défini Holmes, en 1887, dans son *Traité des Machines à Vapeur*, l'enveloppe, en maintenant la température des parois du cylindre à une valeur constante, agit de deux manières : d'abord, en assurant la siccité de la vapeur, et en réduisant sa chaleur spécifique et sa conductibilité d'où diminution de l'action des parois; ensuite, en réduisant les différences de température dans le cylindre grâce à l'écoulement de chaleur auquel elle donne lieu vers la surface intérieure des parois du cylindre. Or, la seule perte qui subsiste en principe se traduit alors uniquement par la chaleur ainsi cédée aux surfaces actives. La dessiccation de la vapeur et la diminution de sa conductibilité ne coûtent absolument rien, car ce sont des phénomènes qui résultent indirectement de la cession continue de chaleur aux parois.

Ainsi l'enveloppe, à considérer les choses à un point de vue très général, a pour effet de modifier les propriétés du fluide moteur, de transformer un fluide, défectueux au point de son utilisation thermique, en un nouveau fluide possédant des caractères différents et plus avantageux, moins bon conducteur, de chaleur spécifique inférieure et se rapprochant plus ou moins complètement d'un gaz permanent. L'effet produit est donc en somme identique à celui qui résulterait d'une surchauffe modérée.

La quantité de chaleur dépensée dans l'enveloppe n'est nullement, comme on l'a cru longtemps, égale à celle qui serait perdue au cylindre si la chemise de vapeur n'existait pas. C'est à cette propriété, aujourd'hui bien connue et définie, que l'enveloppe de vapeur est redevable des résultats économiques dont elle fait preuve dans la majorité des cas.

Toutefois, on ne doit pas oublier que le bénéfice dérivé de l'emploi de l'enveloppe n'est pas gratuit et que cet expédient constitue même une méthode dispendieuse et peu logique de réduction des pertes internes.

M. Thurston[1] a démontré récemment, par un calcul très simple, que l'enve-

[1] *Traité de la Machine à vapeur*, Baudry et Cie.

loppe de vapeur est un élément dont la valeur, toute relative, ne provient que de la réduction qu'elle entraîne d'une perte, plus considérable, et que son utilisation thermodynamique est inférieure à celle de la machine à vapeur elle-même à cause de la plus faible chute totale de température à laquelle est soumise la vapeur à laquelle elle cède de la chaleur.

Si donc le fonctionnement de la machine réelle se rapprochait de celui de la machine idéale, on aurait plus à perdre qu'à gagner à l'emploi de l'enveloppe. Il en sera de même dans tous les cas où la perte par l'enveloppe pendant la période d'échappement sera supérieure au bénéfice recueilli pendant l'admission et la détente. Bref, l'enveloppe est avantageuse dans des conditions intermédiaires qui rendent maximum son efficacité pendant sa période active, et minimum sa perte pendant l'échappement.

L'analyse de l'action de l'enveloppe doit considérer trois cas distincts en ce qui a trait aux machines monocylindres dans lesquelles la vapeur de la chaudière est admise dans l'enveloppe à la même température que dans le cylindre, suivant que la vapeur sera *surchauffée, sèche et saturée, humide.*

Dans le premier cas, le gain résultant de l'effet de l'enveloppe sera extrêmement minime en raison des considérations développées plus haut.

Dans le second cas, l'effet de l'enveloppe sera beaucoup plus sensible ; il y aura accroissement du travail produit, l'enveloppe, agissant normalement, rendant en effet le fluide plus propre à son évolution dans le cylindre et augmentant la quantité de vapeur utile par course par suite de la plus grande activité de la réévaporation.

Dans le troisième cas, la vapeur contenue dans l'enveloppe se comportera comme dans l'exemple précédent dans la supposition que la chemise de vapeur est effectivement purgée de l'eau qui tend à s'y accumuler. Il n'en est pas de même de la vapeur contenue dans le cylindre. L'enveloppe doit alors céder non seulement la chaleur nécessaire pour maintenir la vapeur à l'état de sécheresse et remédier aux condensations initiales, mais encore celle qui correspond à la vaporisation de l'eau entraînée contenue dans la vapeur d'admission. Il en résulte que l'enveloppe fournit une grande quantité de chaleur, particulièrement à la fin de la course. Si toute l'eau entraînée ou de condensation n'est pas entièrement vaporisée au cours de la détente, et il en sera toujours ainsi pour peu que la proportion d'eau entraînée soit notable, cette eau se transformera en vapeur pendant la période d'échappement, et dans une proportion énorme, l'écart de sa température étant alors maximum, aux dépens du calorique de l'enveloppe et cela en pure perte.

Ainsi en résumé, l'*enveloppe paraît donner les résultats les plus avantageux quand la vapeur est sèche et saturée.* Avec de la vapeur surchauffée, l'enveloppe devient inutile.

On doit, entre autres, à M. Dwelshauvers-Déry une remarque intéressante concernant le fonctionnement de l'enveloppe. Ce savant a démontré que, dans les machines monocylindres et dans les conditions les plus favorables, l'enveloppe ne cède que peu de calorique bien que l'effet produit par son emploi soit considérable, car la plus grande partie de la chaleur cédée par les parois du cylindre et employée à la production d'un travail utile pendant la détente, est en réalité fournie à ces parois par la vapeur d'admission elle-même à son entrée au cylindre. D'autre part, dans les appareils compound, la chaleur cédée par l'enveloppe accroît le travail accompli pendant la détente.

C'est surtout à la sensibilité que présente l'enveloppe, à l'état physique de la vapeur et à l'incertitude des méthodes ordinairement employées pour déterminer d'une manière exacte et continue le degré d'humidité de la vapeur, que l'on doit attribuer le désaccord qui existe si souvent entre les résultats des différentes expériences effectuées en vue de déterminer la valeur économique de l'enveloppe.

Un autre fait, qui paraît démontré par l'expérience et qui, du reste, est en parfaite harmonie avec la théorie de l'enveloppe, c'est que l'on a intérêt à envoyer dans celle-ci de la vapeur plus chaude que dans le cylindre, car il se produit, à l'intérieur de ce dernier, une surchauffe plus élevée de la vapeur.

Quand la perte dont l'enveloppe empêche la production dans le cylindre est inférieure à celle qui résulte de son fonctionnement même, son emploi se traduira par un gain réel. Si au contraire les condensations initiales sont réduites par un autre artifice, la chemise de vapeur ne présente plus de valeur pratique. L'enveloppe deviendrait même complètement inutile si les pertes internes dans le cylindre étaient réduites à une moyenne inférieure à celle des pertes normales dans l'enveloppe. C'est ce qui se passe lorsqu'on emploie de la vapeur surchauffée ou que, appliquant le mode compound, on a recours à une machine à détente fractionnée dans plusieurs cylindres disposés en série.

Ces quelques considérations nous montrent déjà qu'il peut exister une limite pratique à l'emploi de la chemise de vapeur dont l'utilité n'est pas indistinctement démontrée pour toutes les applications. Il convient toutefois d'ajouter que l'enveloppe de vapeur possède quelques avantages accessoires qui peuvent acquérir une certaine importance dans des applications spéciales. Il en est ainsi des machines qui, par suite des exigences de leur service, sont appelées à des arrêts fréquents et souvent assez prolongés. L'enveloppe de vapeur permet alors de maintenir, pendant les stoppages, les cylindres à une température suffisamment élevée, d'éviter les condensations et les coups d'eau au moment de la mise en marche et d'assurer un démarrage rapide et sans hésitation.

En résumé, l'enveloppe sera d'autant plus nécessaire que les conditions du fonctionnement seront plus favorables à la production des condensations initiales, à moins qu'elles ne proviennent d'une meilleure conductibilité du fluide due à un degré excessif d'humidité. Autrement dit, c'est la machine monocylindre à condensation, fonctionnant à un degré considérable de détente avec de la vapeur saturée, sèche ou seulement légèrement humide, et à faible vitesse de piston, qui a le plus à gagner de l'emploi de la chemise de vapeur.

Ainsi, M. Dwelshauvers-Déry a reconnu que le bénéfice résultant de l'emploi de l'enveloppe passait de 15 0/0, pour un rapport de détente de 5 volumes à 3 0/0 pour une détente de 3,3 volumes environ.

Si on se résout à leur emploi, on devra admettre la vapeur dans les enveloppes à la température maximum possible dans les circonstances, c'est-à-dire à la pression de la chaudière et en assurer la libre circulation à l'intérieur de la chemise, facteur indispensable de son efficacité. Il est important de chemiser les fonds et, autant que possible, toutes les parties du cylindre soumises à l'écart maximum de température. Les parois intérieures des chemises de vapeur seront aussi minces que possible afin d'assurer et de faciliter l'échange de calorique entre la vapeur de l'enveloppe et les parois internes du cylindre.

Quels que puissent être les avantages des enveloppes de vapeur, on ne doit pas oublier que la locomotive est une machine à grande vitesse et que, comme telle, elle n'a que peu de chose à gagner à leur emploi. Des expériences très précises de M. Schröter ont confirmé les déductions que l'on peut tirer de l'étude théorique des faits ; elles ont montré que l'action de l'enveloppe devient très faible pour les petites introductions et nulle pour les grandes, lorsque la vitesse du piston s'élève à une limite très inférieure même à celle qui est atteinte dans la locomotive. Pour cette machine, la chemise de vapeur ne peut présenter d'avantages qu'aux très faibles vitesses, ou au moment des démarrages en évitant l'importante condensation qui se produit lorsque l'arrêt a été prolongé. Malgré tout, l'enveloppe de vapeur n'a jamais rencontré de faveur auprès des constructeurs de locomotives. Les quelques avantages thermiques qu'elle procure ne sauraient entrer en ligne de compte avec la complication et l'augmentation de poids qu'elle entraîne dans cette application spéciale.

D'ailleurs, nous l'avons dit plus haut, pour que l'enveloppe ait un rôle suffisamment actif il est nécessaire que sa température soit supérieure à celle même de la vapeur d'admission. Il est certain que si cette condition pouvait être réalisée, on en retirerait une économie notable bien qu'en allant trop loin dans cette voie on risquerait de rendre le graissage des cylindres impossible.

Quand les cylindres sont intérieurs, placés dans la boîte à fumée et soumis à l'action des gaz chauds, les condensations intérieures sont nettement moins marquées. Des essais comparatifs effectués il y a très longtemps entre une machine à cylindres intérieurs du *Great Western Ry* et une locomotive à cylindres extérieurs du *Caledonian*, relatés dans l'ouvrage classique de Clark, ne laissent aucun doute à cet égard. Les cylindres et boîtes à tiroir de la première machine étaient placés dans la boîte à fumée et entourés par les gaz chauds. Quel que fût le degré de détente, on ne constatait pas de variation sensible des condensations intérieures. Dans la seconde, dont les cylindres étaient exposés à l'air froid, la valeur des condensations passait de 11 0/0 pour une admission de 0,75 à 42 0/0 pour une admission de 0,12.

105. Surchauffe de la vapeur. — Nous laissons de côté, pour le moment, les avantages thermodynamiques que peut présenter la vapeur surchauffée pour ne la considérer qu'au point de vue thermique un peu négligé jusque dans ces dernières années.

En surchauffant la vapeur avant son admission au cylindre, on détermine la production d'un fluide capable de fournir aux parois du cylindre une certaine quantité de calorique, ayant pour mesure le produit de sa chaleur spécifique, en tant que gaz, par son degré de surchauffe et par son poids, sans qu'il se produise de condensation initiale. Si cette quantité de chaleur est égale à celle qui est perdue pendant la détente et l'échappement, il n'y aura pas de condensations initiales et, si elle lui est supérieure, la seule perte qui persistera sera sensiblement égale à celle qu'éprouverait un gaz chaud traversant le cylindre. La course complète du piston pourra alors s'accomplir sans qu'il se produise de condensations du fait de l'admission ou de la détente. Le cylindre ne se refroidira donc pas autant pendant l'échappement, et la perte initiale sera réduite d'autant.

Comme les gaz permanents, la vapeur surchauffée est mauvaise conductrice de la chaleur et présente une faible chaleur spécifique. Elle est donc moins sujette aux pertes que nous envisageons, que la vapeur saturée et humide.

On trouverait, dans la surchauffe de la vapeur, un auxiliaire des plus précieux, capable de supplanter tous les autres artifices inventés dans le même but, si les raisons pratiques n'intervenaient pas et s'il était possible de la pousser assez loin. On se trouverait en présence d'un fluide présentant toutes les propriétés des gaz permanents, joints aux avantages que présente la vapeur d'eau à haute pression comme fluide moteur. En un mot on pourrait combiner le rendement thermodynamique élevé des machines à gaz avec l'utilisation mécanique des meilleurs appareils à vapeur.

Plus la surchauffe est considérable, c'est-à-dire plus la température est supérieure à celle qui correspondrait à la saturation, à la même pression, et plus son rôle acquiert d'importance dans l'amélioration de la « qualité » de la vapeur, plus les pertes internes seront faibles et plus le rendement thermique sera élevée. Si même cette vapeur peut être à une température suffisamment élevée, elle fournira aux parois du cylindre la quantité de calorique nécessaire pour les porter à la température correspondant à celle de la vapeur saturée à la pression considérée, sans qu'il s'en condense la moindre fraction. On éliminerait ainsi la perte par condensations et réévaporations intérieures, la vapeur ne se comportant plus que comme un gaz permanent, ce qui, d'après Hirn, se produit dès que la surchauffe atteint 9° C. Siemens a trouvé d'autre part que cette limite correspond, pour la vapeur produite à la pression atmosphérique et saturée à 100°, à une surchauffe de 10° C. environ.

A la suite de calculs intéressants [1], mais que nous ne pouvons développer ici, M. Thurston a démontré que le degré de surchauffe doit, pour éviter toute condensation initiale, s'élever à environ 10° F. par chaque centième d'eau condensée initialement au cylindre. Ainsi, dans une machine bien établie, où les condensations ne seraient pas supérieures à 15 0/0, une surchauffe de 150° F., soit environ 66° C., serait suffisante pour annuler complètement les condensations initiales. Si la machine fonctionnait à une pression de 6 k., correspondant à une température de 165° C., la température de la vapeur, après surchauffe, s'élèverait à 231° C. seulement. Il est juste de dire, toutefois, que la valeur des condensations initiales, choisie comme exemple, est assez faible et qu'il n'est pas rare, dans les machines monocylindres, de la voir s'élever à 35 et 50 0/0 dans des appareils convenablement étudiés pourtant et fonctionnant dans des conditions normales.

Pour assurer à l'échappement une surchauffe de 10 à 13° il faudrait alors une surchauffe initiale d'environ 250°, ce qui, pour de la vapeur saturée à 180° seulement, porterait la température de la vapeur d'admission à 430°, ce qui est inadmissible et impossible à réaliser en pratique. Avec les températures usuelles aujourd'hui on ne saurait admettre une surchauffe de plus de 50 à 60°, déjà bien difficile à obtenir.

Les difficultés pratiques auxquelles donne lieu l'emploi de la vapeur surchauffée proviennent de ce qu'elle ne contient plus en suspension la moindre trace d'eau à l'état liquide ou vésiculaire, pouvant assurer, jusqu'à un certain point, la lubréfication des surfaces du cylindre et à ce que sa température élevée entraîne la décomposition des huiles employées au graissage des cylindres d'où résultent le grippage des glaces, des segments et des gar-

[1] *Manual of the steam Engine.*

nitures, suffisant pour paralyser le fonctionnement et la mise en liberté de gaz éminemment combustibles. Ce dernier inconvénient se présente un peu atténué par l'emploi des huiles minérales, qui n'émettent de vapeurs inflammables que vers 260° C., alors qu'une température de 230° est suffisante, dans la plupart des cas, pour assurer une surchauffe capable de donner, en pratique, des résultats sensibles. Une marge de sécurité de 30° à 40° nous paraît toutefois bien insuffisante, pour qu'un échauffement dû à un grippage éventuel ne cause pas quelque avarie.

La surchauffe de la vapeur peut être opérée par deux moyens bien distincts :

1° *Application directe de chaleur à la vapeur;*
2 *Détente non accompagnée de travail* (*surchauffe spontanée de Hirn*).

Le premier de ces procédés n'a pas été appliqué dans toute sa rigueur aux locomotives. Les surchauffeurs sont lourds, encombrants, coûteux et ont un effet utile peu considérable parce que la température des gaz dans la boîte à fumée n'est pas assez élevée pour leur communiquer une activité suffisante. Leur durée est des plus faibles à cause de la faible conductibilité de la vapeur qui ne s'oppose pas à l'échauffement excessif de leurs parois; ils sont vite rongés par oxydation et corrosion et on ne peut tenir leurs joints.

Dans la plupart des locomotives, les tuyaux conduisant la vapeur aux cylindres passent à l'intérieur de la boîte à fumée. En raison de la rapidité avec laquelle la vapeur les traverse, du peu de surface qu'ils présentent et de la température trop basse des gaz qui les entourent, ils ne donnent lieu à aucune surchauffe sensible. Le seul avantage de cette disposition, d'ailleurs rationnelle, est de préserver les tuyaux du contact de l'air extérieur et d'éviter les condensations.

Le second procédé ne peut donner lieu, dans les conditions de la pratique, qu'à une surchauffe minime. Si on laisse se détendre, sans production de travail externe, un poids donné de vapeur, d'une pression de 11 k. par exemple à celle de 8 kg., la surchauffe n'est capable que de vaporiser 6,4 0/0 de l'eau entraînée, ce qui est peu. Ce procédé a cependant été appliqué avec succès par M. l'Ingénieur en chef Polonceau à quelques machines de la Compagnie d'*Orléans*, mais en quelque sorte indirectement, comme conséquence de l'adoption d'un timbre très élevé pour les chaudières nécessitant l'emploi d'un détendeur réduisant la pression dans les boîtes à tiroir. La vapeur est engendrée à 15 kg. pour être utilisée à 10 ou 12 kg. au moyen du détendeur.

L'emploi du détendeur automatique de vapeur, qui est en application à la Compagnie d'Orléans, permet d'augmenter le timbre des chaudières de rechange des anciennes machines pour les mettre en rapport avec des néces-

sités de trafic, soit de 8 ou 9 kilogrammes à 15 kilogrammes, tout en faisant travailler les pièces du mécanisme à peu près dans les conditions pour lesquelles elles ont été établies[1].

Cet appareil peut aussi être employé, lors de la construction des locomotives, dans le but d'augmenter leur puissance de traction sans donner aux

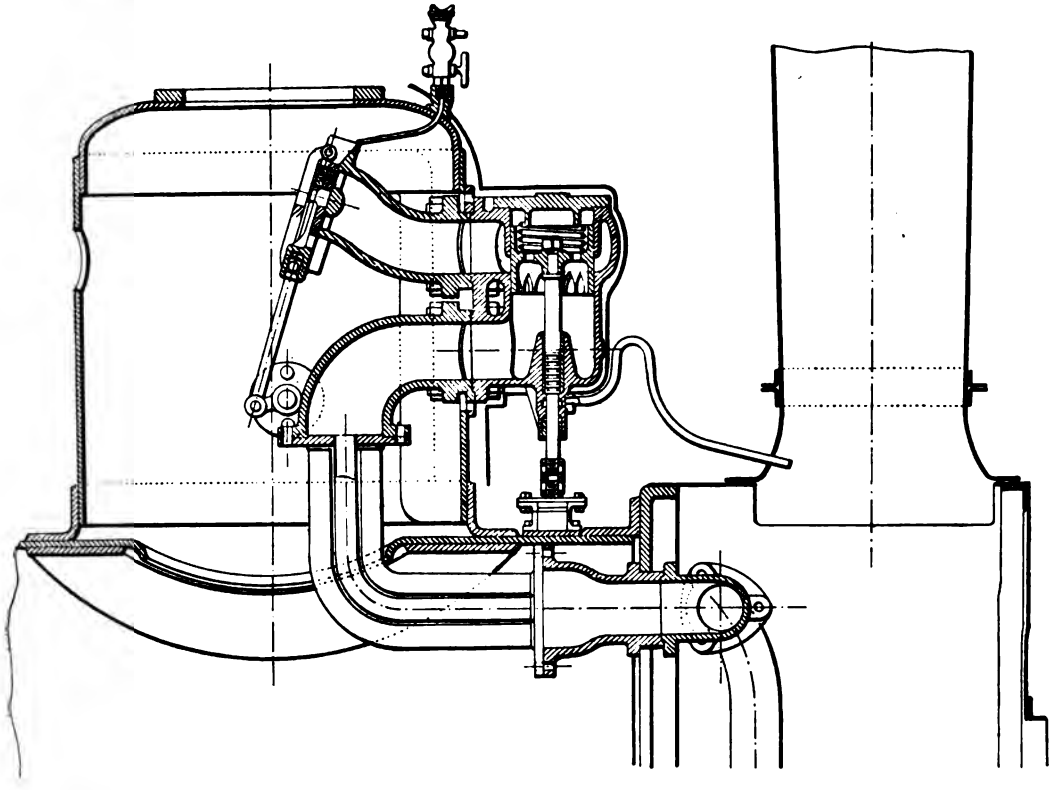


Fig. 270. — Détendeur Durant et Lencauchez (*Chemin de fer d'Orléans*).

organes de leur mouvement de très fortes dimensions, augmentant notablement leur poids.

Enfin, son emploi, permettant d'accumuler dans la chaudière une plus grande quantité de chaleur, peut donner plus de ressources pour faire face aux dépenses de vapeur anormales, nécessitées par une marche difficile ou pour monter de longues rampes.

Cet appareil (fig. 270) se compose en principe d'un cylindre vertical, interposé sur la conduite de prise de vapeur, dans lequel se déplace automatiquement un piston qui ouvre ou ferme l'orifice de passage de la vapeur, suivant que la pression diminue ou augmente dans la conduite en dessous de lui.

[1] Voir la *Notice* de cette Compagnie sur les *Objets exposés* à Paris en 1889.

Pour que le piston se déplace automatiquement dans le sens nécessaire, par l'effet de la pression dans ce cylindre, il est percé de trous dans sa partie médiane afin que la vapeur afflue sur ses deux faces et ne produise ainsi un effort que sur leur différence de surface qui est égale à la section de la tige et cette tige est reliée à un ressort antagoniste lequel, par sa bande, fait équilibre à l'effort qu'elle supporte.

Par ces dispositions, lorsque la pression augmente dans la conduite de vapeur à la suite du détendeur, le ressort fléchit et fait descendre le piston qui ferme ainsi l'orifice de passage de vapeur, tandis qu'au contraire il ouvre cet orifice lorsque la pression diminue et qu'il est soulevé par l'effet de la bande initiale du ressort.

Le ressort antagoniste est à pincette et sa flexibilité est très grande afin de produire un débit variable suivant les besoins.

La section de la tige du piston est relativement petite pour que les forces à équilibrer, les chocs et oscillations soient peu considérables.

L'attache de la tige et du ressort est faite avec deux vis à pas contraires et un manchon à écrou pour faciliter le réglage de la pression d'admission aux cylindres par la bande initiale du ressort.

Le presse-étoupe forme un joint hydraulique à frottement réduit au moyen de cannelures faites sur la tige et d'un tuyau recourbé pour l'évacuation à la cheminée.

L'ouverture de l'orifice de passage de vapeur se fait progressivement par l'effet des dents à forme triangulaire dont la partie inférieure du piston est munie ; un ressort à boudin placé sur le piston sert à amortir les chocs qui peuvent se produire sur le plateau supérieur du cylindre.

Le tuyau de conduite de vapeur, à la suite du détendeur, pénètre dans la chaudière et se divise en sept tuyaux de cuivre rouge, pour que la vapeur détendue soit surchauffée par la chaleur de la vapeur de la chaudière, avant d'arriver aux cylindres.

Cet appareil est appliqué aux plus récentes machines express de la *Compagnie d'Orléans* (nos 77 à 86) et à de nombreux types plus anciens, qui ont reçu une chaudière de rechange (express 171 à 264; marchandises 658 à 791).

II

DISTRIBUTIONS PERFECTIONNÉES[1]

106. Le tiroir ordinaire dit à coquille est assurément un organe mécanique très remarquable par sa simplicité contrastant avec la complexité des opérations qu'il est chargé d'assurer. Toutefois, cette simplicité, si avantageuse dans la plupart des cas, est achetée au prix de certains inconvénients qui peuvent prendre une importance réelle quand on désire, à la suite d'un accroissement du timbre, augmenter le degré de détente à opérer dans chaque cylindre. On ne peut pas faire varier, indépendamment les unes des autres, les différentes phases du cycle que parcourt la vapeur, l'avance à l'échappement et la compression prenant une valeur plus grande à mesure que l'on diminue l'introduction. En outre, la vapeur, pour pénétrer dans le cylindre et en sortir, doit traverser des conduites dont les coudes nombreux causent des pertes de charge et dont le volume exagéré accroît inutilement l'espace mort tandis que leur surface refroidissante, exposée au contact tantôt de la vapeur d'admission tantôt de la vapeur d'échappement, entraîne des condensations nuisibles.

L'échappement anticipé s'accroît avec la réduction du degré d'admission au point de devenir, au point mort, égale à la moitié de la course du piston; la vapeur s'échappe alors avant d'avoir épuisé sa force expansive.

Ainsi, dans les locomotives proportionnées comme il est d'usage, pour une admission de 20 0/0, l'avance à l'échappement commence environ aux 0,66 de la course du piston, ce qui, si l'on tient compte des espaces morts, permet une détente de 3 volumes au plus et donne théoriquement, pour une pression initiale de 9 kg., une pression, au début de l'échappement, de 3,2 kg. environ.

Il est donc impossible d'opérer une forte détente nominale puisque, si on réduit l'admission, on augmente l'avance à l'échappement qui diminue la période d'expansion.

Cependant, en pratique, il n'en est pas tout à fait de même parce que le tiroir, par son imperfection même, remédie à ces inconvénients : il n'ouvre

[1] *De la production et de l'emploi de la vapeur considérée comme force motrice, principalement dans les locomotives*, par MM. Durant et Lencauchez. (*Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, numéro de juin 1890.) — *Note sur le système de distribution de vapeur à tiroirs indépendants*, par M. E. Polonceau. (*Annales des Mines*, numéro de novembre 1893.) — *Nouvelles locomotives à voyageurs des Chemins de fer de l'État*, par M. E. Guédon. (*Portefeuille économique des Machines*, numéros de mars, avril et mai 1893.) — *Comparaison entre les locomotives compound et les locomotives à simple expansion munies d'une distribution perfectionnée*, par M. J. Nadal, ingénieur des Mines. (*Revue Générale des Chemins de fer*, numéro de juin 1895.)

l'orifice que graduellement, la vapeur se lamine à son passage dans les orifices d'admission et d'échappement, au point qu'il est bien difficile, sur les diagrammes relevés à grande vitesse, de désigner le point où finit l'admission et où commence l'échappement. Autrement dit, la vapeur commence déjà à se détendre dès le début de la course, même pendant la période d'introduction, la vitesse du piston étant trop grande pour que la section des lumières soit suffisante pour maintenir la pression, derrière le piston, au même taux que dans la boîte à tiroir. De même, pendant la période d'échappement anticipé, elle continue, surtout au début, à se détendre encore pour la raison inverse. La détente réelle est donc notablement supérieure à la détente fictive qui résulte de la régulation ; elle est en réalité presque double aux petites introductions et aux grandes vitesses.

D'autre part, l'avance à l'échappement est favorable au jeu du piston, surtout aux grandes vitesses, particulièrement lorsque l'admission est prolongée et que le volume de vapeur débité par le cylindre est considérable. Si cette avance est insuffisante, la contre-pression peut devenir assez élevée pour diminuer notablement la puissance que la machine est capable de développer aux grandes vitesses.

La réduction de l'effort de traction, à mesure que la vitesse s'accroît, en admettant même que la chaudière ait une puissance indéfinie, provient, on le sait, de ce que le laminage de la vapeur et l'accroissement de la contre-pression aux grandes vitesses réduisent la pression moyenne effective sur les pistons[1]. Si on abandonnait à elle-même, après le démarrage, une locomotive remorquant un train extrêmement léger, et possédant une capacité de vaporisation des plus considérables, la vitesse atteindrait bientôt une valeur limite qui ne saurait être dépassée. Si, en effet, le volume des cylindres, déterminé en vue d'assurer au démarrage l'effort de traction nécessaire, est exagéré pour le travail qui doit être normalement développé en vitesse, les conduits de vapeur, en revanche, souvent resserrés faute de place, deviendront rapidement insuffisants à mesure que le nombre de tours augmentera.

Le laminage réduit la pression sur la face active du piston, tandis que l'engorgement de l'échappement augmente la contre-pression sur son autre face, ce qui diminue la pression moyenne effective sur le piston et le travail produit par tour. La puissance développée augmente cependant avec la vitesse, on le sait, parce que celle-ci s'accroît plus rapidement que la pression effective ne diminue.

Une première perte de charge se produit entre la chaudière et la boîte du tiroir par suite du laminage à travers les orifices du régulateur et en raison des coudes du tuyau de prise de vapeur ; une autre perte, généralement plus

[1] Voir notre article paru dans le *Bulletin de la Commission Internationale des Chemins de fer* (numéro de mars 1896).

importante, se produit pendant la période d'admission, entre la boîte à tiroir et le cylindre. Grâce à cette dernière perte, la dépense de vapeur réelle est notablement inférieure à celle qui correspond au degré d'admission indiqué par la position qu'occupent les coulisses, et cela d'autant plus que la vitesse de marche est plus élevée. A une introduction nominale de 30 0/0 correspond, à la vitesse de 90 km. à l'heure, une dépense de vapeur par coup de piston souvent inférieure à celle qui résulterait d'une introduction de 15 0/0 à la vitesse de 20 km.

Si l'on ne modifie pas les cylindres d'une locomotive ou tout au moins leurs conduits de vapeur, il ne servirait en rien, passé une certaine limite, d'augmenter la capacité de la chaudière, puisque les cylindres ne pourraient plus débiter toute la vapeur produite. On ne saurait alors profiter de l'accroissement de la production pour augmenter le degré d'introduction, la section des orifices d'admission, mais surtout d'échappement, devenant beaucoup trop faible à la vitesse considérée. Les mécaniciens remarquent parfois, quand leur machine est déjà lancée à une vitesse considérable, qu'à une plus grande ouverture du régulateur correspond souvent une réduction de vitesse au lieu de l'accroissement sur lequel on serait en droit de compter. Ce fait, en apparence paradoxal et pourtant bien connu, tient, on le sait, à l'insuffisante section de l'échappement d'autant plus marquée qu'aux grandes vitesses les coulisses sont généralement relevées, la course des tiroirs est très réduite et la période d'émission moins longue.

La puissance de la machine, aux grandes vitesses, se trouve ainsi limitée, même au cas où la production de la chaudière serait suffisante. Toutefois, on n'a pas eu beaucoup d'intérêt jusqu'ici à accroître la section des conduits parce que la limite qu'elle impose au travail produit correspond sensiblement à celle qui résulte de la capacité des chaudières actuellement employées et des vitesses normalement réalisées.

Cependant, il n'est pas douteux que la limitation de la vitesse de certaines locomotives, plus défectueuses sous ce rapport, ne soit dû à cette cause ; c'est ce que les mécaniciens expriment en disant de ces machines qu'elles *courent mal*. En outre, l'augmentation des vitesses peut conduire à envisager sérieusement cette question pour les locomotives des trains rapides en général.

Or, le tiroir ordinaire à coquille se prête mal à l'accroissement de la section des lumières ; que l'on allonge ou que l'on élargisse celles-ci, il y aura fatalement augmentation des espaces morts et de la surface exposée par le tiroir à la pression de la vapeur, inconvénients qui influent l'un sur l'utilisation de la vapeur, l'autre sur le rendement mécanique. Les tiroirs deviendront en outre encombrants, difficiles à loger et le surcroît de résistance qu'ils présenteront nécessitera le renforcement de tous les organes de la distribution.

Nous verrons que, malheureusement, la plupart des nouvelles distributions proposées ou employées pour remédier à l'insuffisance de section des lumières ne répondent encore que très imparfaitement à ce desideratum.

On avait autrefois cherché à remédier à quelques-uns des inconvénients du tiroir simple en superposant deux tiroirs dont l'un, placé contre la table, effectuait la distribution, admission et échappement, et dont on ne faisait pas varier la course ; il était réglé pour les grandes admissions et on opérait la détente variable en modifiant la course du second tiroir actionné par les mêmes excentriques. On pouvait ainsi augmenter le degré de détente sans accroître outre mesure les avances et le laminage à l'échappement, autrement dit sans dérégler les phases d'échappement. C'est ce qui est réalisé dans les machines fixes par le tiroir Meyer et qui a été appliqué autrefois par M. C. Polonceau à quelques locomotives de la Compagnie d'*Orléans*. Les résultats obtenus avec ce dernier dispositif ne furent pas satisfaisants, l'économie réalisée, s'il y en avait une, ne compensant pas la perte résultant du frottement des deux tiroirs et de la complication du mécanisme.

M. l'Inspecteur général Ricour aux *Chemins de fer de l'Etat*, M. Worsdell au *North Eastern Ry* et M. Vauclain aux Etats-Unis ont cherché, par l'emploi de tiroirs cylindriques, à réduire la perte due à l'excès de longueur et de surface des conduits, en même temps que le travail absorbé par le frottement des tiroirs. De même, de nombreuses tentatives ont été effectuées dans le but d'équilibrer les tiroirs ordinaires au moyen de compensateurs d'un emploi général en Amérique. C'est, d'ailleurs, là une question sur laquelle nous reviendrons ailleurs.

Depuis on a repris le problème sous une autre face.

Si l'on divise le tiroir en deux parties indépendantes commandant l'une l'admission, l'autre l'échappement, on peut devenir maître de régler, pour toute admission donnée, le point où devra commencer l'avance à l'échappement anticipé, c'est-à-dire le plus près de la fin de la course qu'il sera possible sans augmenter la contre-pression devant le piston. La distribution à l'admission sera effectuée par un tiroir simple à deux barrettes commandé par une coulisse ordinaire et le tiroir d'échappement soit au moyen d'un excentrique spécial, soit par un balancier articulé par une extrémité à la tête de la tige du piston.

Certains inventeurs sont allés plus loin et ont étudié l'application à la locomotive des distributions à déclic, analogues au type Corliss, dans lesquelles les tiroirs d'admission sont eux-mêmes indépendants et peuvent ouvrir ou fermer les lumières avec la plus grande rapidité, ce qui a une action marquée sur la réduction du laminage.

Les avantages que l'on recherche, dans l'établissement des nouvelles distributions, par l'indépendance des tiroirs d'admission et d'échappement, con-

sistent dans les points suivants ayant trait à l'amélioration soit du régime économique, soit du fonctionnement :

(*a*). Indépendance des phases d'admission et d'échappement, permettant de régler à volonté et de rendre constant l'échappement anticipé, par conséquent de prolonger la détente, et donnant le moyen de déterminer dans la mesure convenable le degré de compression ;

(*b*). Diminution du volume des espaces morts ;

(*c*). Séparation des conduits d'admission et d'échappement ;

(*d*). Réduction du laminage et des pertes de charge ;

(*e*). Diminution du travail absorbé par le frottement des tiroirs.

Ces appareils ne sauraient présenter d'avantages réels que s'ils entraînent une économie assez importante pour qu'elle ne soit pas contre-balancée par un accroissement des frais d'établissement d'entretien et s'ils n'offrent pas une délicatesse incompatible avec le service des locomotives.

La première application d'une distribution de ce genre a été effectuée aux Etats-Unis par M. *Strong* vers 1886 [1]. Ce système comprend quatre tiroirs à grille, dont deux d'échappement et deux d'admission, indépendants et commandés par deux coulisses distinctes permettant d'assurer l'indépendance des phases tandis que les nombreux canaux percés dans les tiroirs avaient pour effet de réduire le laminage. La distribution était commandée par une disposition cinématique du type radial, analogue au système Marshall et qui avait sur la coulisse ordinaire l'avantage d'accroître un peu la vitesse des tiroirs au moment de l'ouverture et de la fermeture des lumières. Quoi qu'il en soit, ce système, qui présentait encore des espaces morts trop considérables et une grande complication et n'a fait preuve que d'une économie bien faible malgré tout le soin dont il était entouré, ne s'est pas répandu. On a supprimé cette distribution, sur la machine où on l'avait établie, pour la remplacer par des tiroirs ordinaires.

M. F.-J. Stevens, ingénieur en chef du *Southern Pacific RR.*, a appliqué à une soixantaine de locomotives de ce réseau, actuellement en service, une distribution à deux tiroirs dont le schéma de la figure 271 représente la disposition d'ensemble. Le tiroir usuel est remplacé par deux tiroirs à canal dont les tiges — l'une d'elles est creuse — jouent l'une dans l'autre à travers le même presse-étoupes. Une coulisse commande le changement de marche et règle le degré de détente tandis que les avances sont données, comme dans la distribution Walschaërt, par un levier articulé sur la crosse. Les tiroirs se déplacent lentement vers le milieu de la course et plus vite aux extrémités. Les diagrammes relevés sur les cylindres munis de cette distribution sont très pleins et indiquent une diminution marquée du laminage, ce qui ne paraît pas

[1] *Revue Générale des Chemins de fer*, numéro d'octobre 1887.

avoir été avantageux. En effet, si les machines comportant la distribution Stevens ont fait preuve d'une certaine économie, on n'a pas néanmoins donné d'extension au système depuis plusieurs années, particulièrement à cause de

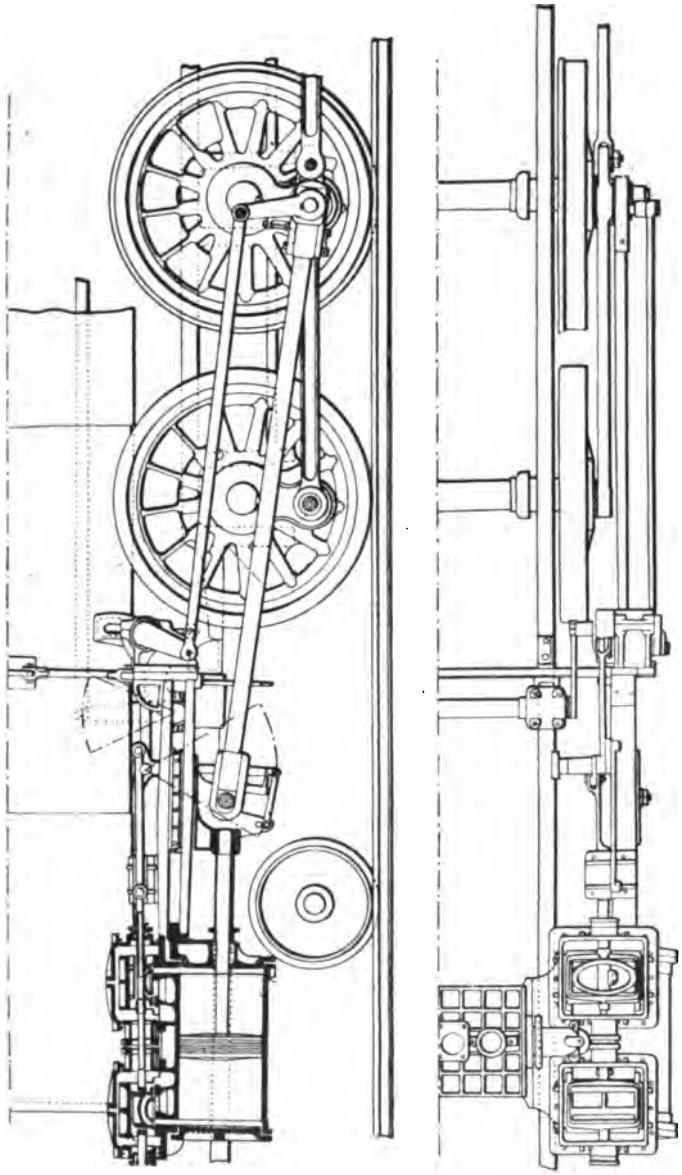


Fig. 271. — Distribution Stevens (*Southern Pacific Railroad*).

l'usure rapide des articulations (coussinets des boîtes et des bielles, boutons des manivelles, etc.) attribuée aux chocs provenant de l'admission trop brusque de la vapeur à bout de course.

Plusieurs essais de distributions perfectionnées ont été effectués en France depuis 1888, d'abord celle du système *Bonnefond* à déclic, aux chemins de

fer de l'*Etat;* ensuite, presque à la même époque, plusieurs types de distribution sans déclic des systèmes *Lencauchez et Durant* à la Compagnie d'*Orléans*, puis, plus récemment, sur deux locomotives de la Compagnie de l'*Est*.

Nous examinerons ces deux systèmes dans leurs grandes lignes.

Distribution A. Bonnefond[1]. — Dans cette distribution (fig. 272), les phases d'échappement anticipé et de compression ont une valeur constante pour tous

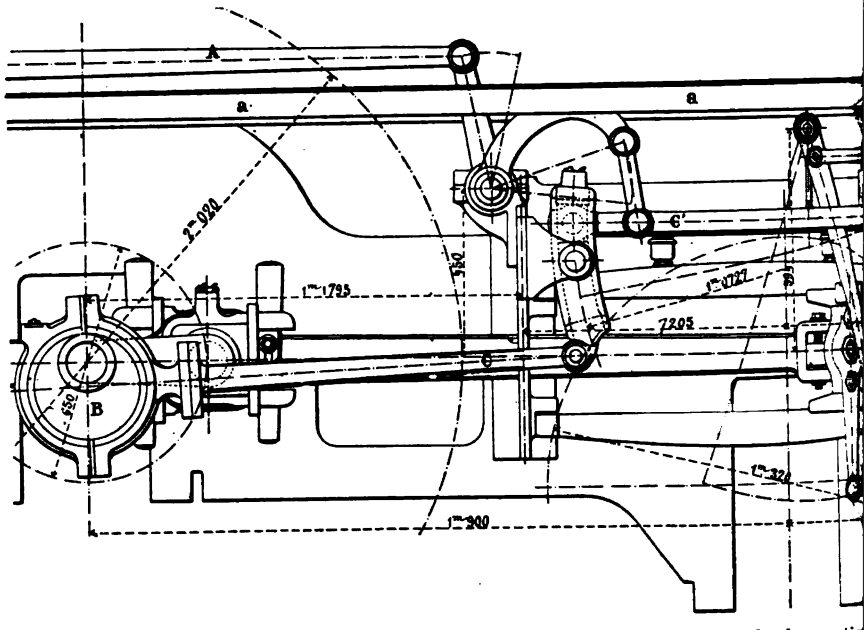


Fig. 272. — Distribution du système Bonnefond, des locomotives

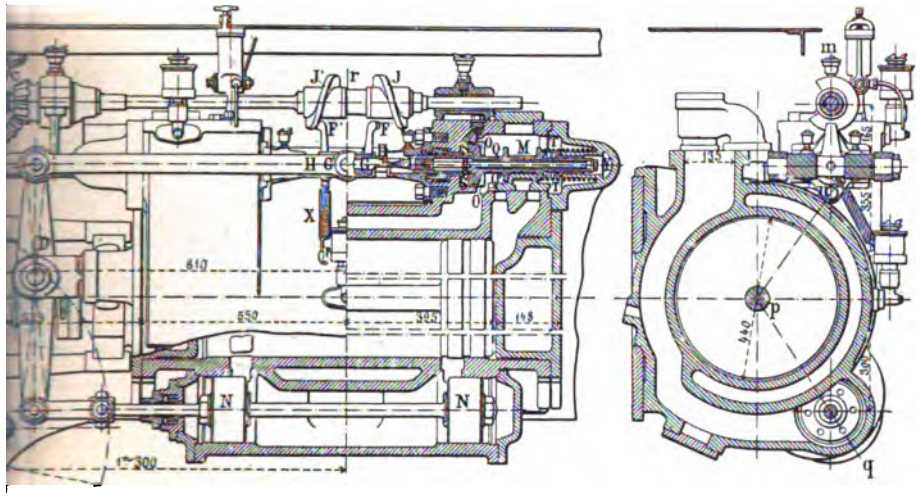
les degrés de détente. La durée de l'introduction est réglée par deux tiroirs à déclic; l'échappement est assuré par un tiroir, cylindrique dans les derniers modèles, actionné par un renvoi de mouvement articulé sur la bielle des tiroirs d'admission que commande une coulisse. Le déclic, variable à volonté, est opéré par un appareil spécial indépendant de la distribution proprement dite et actionné par la tige de piston.

La manœuvre de cette distribution est commandée par deux volants à la main du mécanicien, dont l'un, le *volant de changement de marche*, sert à déplacer, par l'intermédiaire de la barre A et de différents leviers, le coulisseau à l'intérieur de la coulisse, pour produire *seulement* le changement du sens de la marche. Le second volant, beaucoup plus petit, est appelé *volant de détente*, et s'emploie, comme son nom l'indique, pour régler l'admission de la vapeur dans les cylindres en agissant sur la barre *a*, le secteur et les roues dentées *b* et *c*.

[1] *Portefeuille des Machines*, avril 1893.

La coulisse reçoit son mouvement de l'excentrique B monté sur le prolongement de la manivelle motrice et le transmet, par l'intermédiaire de la barre C et de la partie supérieure du balancier D, à deux cliquets articulés FGH, F'G'H', qui font mouvoir à leur tour deux tiroirs d'admission, semblables M, placés vers la partie supérieure du cylindre. La partie inférieure du balancier donne le mouvement à deux tiroirs d'échappement N, N, situés vers le bas du cylindre.

Le mouvement de chaque cliquet, FGH par exemple, se transmet au tiroir



ule vitesse (série 2602-2620) des Chemins de fer de l'*État français*.

d'admission correspondant par l'intermédiaire d'une touche I, qui termine la tige du tiroir, et le mouvement de ce tiroir se continue ainsi, pour produire la période d'admission, jusqu'à ce que la partie FG du cliquet rencontre la portion d'hélice J : le cliquet pivote alors autour de son axe, la touche H se lève, cesse d'être en contact avec la touche I de la tige, et le mouvement d'ouverture du tiroir s'arrête.

La tige du tiroir d'admission a, en QQ', un diamètre de 50 mm. tandis qu'à l'autre bout ce diamètre est de 40 mm. seulement. Un piston P, dit piston de rappel, relie ces deux parties entre elles, et est pourvu d'un segment en bronze qui coulisse dans une chemise en acier SS'. Cette dernière qui a une longueur de 70 mm., possède, aux extrémités de deux diamètres à angle droit, quatre rainures en biseau de 1 mm. de profondeur à l'origine et 40 mm. de longueur. Lorsque le tiroir est ouvert pour l'admission, le piston P occupe la position indiquée sur la figure, de sorte que la vapeur de la chaudière passe par les rainures précitées, et vient se loger en O.

Le piston P est de la sorte soumis sur ses deux faces à des pressions d'une valeur totale différente, et dès que la touche H se lève, cessant d'entraîner le tiroir, ce piston est poussé automatiquement, et le tiroir vient fermer immédiatement l'orifice d'introduction. Ce mouvement est facilité par l'action du ressort TT', exerçant un effort initial de 40 kg. lors de la plus grande course du tiroir, et qui, dans la marche à régulateur fermé, opère seul ce rappel.

La touche H, étant levée, vient glisser sur la touche I, lorsqu'elle est abandonnée par le taquet hélicoïdal J, — lequel reçoit lui-même un mouvement de va-et-vient de la crosse du piston, — et que l'excentrique, changeant de direction, revient vers l'arrière en entraînant dans son mouvement les cliquets FGH, F'G'H' : quand l'extrémité de la touche H se trouve ainsi en regard de l'extrémite de la touche I, l'action des ressorts X fait revenir le cliquet dans la position indiquée sur la figure, et à un autre changement de direction de l'excentrique il entraîne le tiroir pour produire une nouvelle admission.

Nous avons vu que la fermeture de l'orifice d'admission, et par conséquent la durée de l'introduction, était déterminée par la rencontre de l'hélice J et du cliquet FGH ; en éloignant ou en rapprochant le point de butée de l'hélice et du cliquet, on augmentera donc ou on diminuera l'introduction elle-même. Ce résultat s'obtient, nous l'avons dit, en manœuvrant le volant de détente, qui vient agir en dernier lieu sur le pignon *c* et éloigner ou rapprocher ainsi les points de butée des cliquets des taquets hélicoïdaux, J et J'.

La période d'admission peut varier entre 0 et 72 0/0 de la course du piston.

Tableau donnant les phases d'une distribution Bonnefond appliquée aux locomotives des chemins de fer de l'État.

DURÉE d'introduction en centièmes de course.	AVANCE LINÉAIRE Millim.		OUVERTURE MAXIMA des orifices.		DÉTENTE P. 100.		ÉCHAPPEMENT ANTICIPÉ P. 100.		ÉCHAPPEMENT TOTAL P. 100.		COMPRESSION P. 100.		CONTRE-VAPEUR P. 100.	
	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV	AR	AV
72	6	6	32	32	23	24	5	4	88	88	11	11	1	1
70	6	6	32	32	25	26	5	4	88	88	11	11	1	1
60	6	6	32	32	35	36	5	4	88	88	11	11	1	1
50	6	6	32	32	45	46	5	4	88	88	11	11	1	1
40	6	6	31	31	55	56	5	4	88	88	11	11	1	1
30	6	6	30	30	65	66	5	4	88	88	11	11	1	1
20	6	6	27	27	75	76	5	4	88	88	11	11	1	1
10	6	6	24	24	85	86	5	4	88	88	11	11	1	1
0	6	6	0	0	95	96	5	4	88	88	11	11	1	1

Longueur de la bielle motrice : 1,80 m. — Diamètre des cylindres : 440 mm. — Course des pistons : 650 mm. — Course de l'excentrique : 125 mm.

Les lumières du cylindre sont doubles, et elles ont chacune 35 mm. de

hauteur sur 170 mm. de longueur; elles sont découvertes, à l'introduction de 20 0/0, de 26 mm. ; de 30 mm. à l'introduction de 30 0/0 ; de 31 mm. à celle de 40 0/0, et de 32 mm. à partir de 50 0/0. Le passage offert à la vapeur est ainsi bien plus considérable, aux faibles admissions surtout, que dans les locomotives ordinaires, condition favorable à l'obtention de grandes vitesses ; les orifices étant, de plus, fermés très rapidement dès que l'introduction est terminée, le laminage se trouve supprimé.

L'échappement anticipé a toujours lieu au même point de la course du piston, quel que soit le degré de détente puisque les tiroirs d'échappement sont commandés par le balancier D qui reçoit son mouvement de la coulisse. Il est réglé pour se produire aux 0,96 de la course de sorte que, pour des admissions de 0,10, 0,20, 0,30, la détente nominale a lieu pendant les 0,86, 0,76, 0,66 de cette course, soit beaucoup plus que dans les locomotives munies de tiroirs ordinaires. Mais, d'autre part, cette avance à l'échappement est absolument insuffisante pour la marche en vitesse, surtout avec un train lourd obligeant à ouvrir d'une assez grande quantité le régulateur et à fonctionner avec une admission prolongée. Cette distribution, à ce point de vue, ne répond donc pas au desideratum que nous avons exposé plus haut en ce qui concerne l'amélioration du fonctionnement en vitesse. Elle présente même plus d'inconvénients de ce côté que les distributions ordinaires par tiroir. Elle peut donner une certaine économie de vapeur par suite de l'augmentation de la détente, mais elle ne fonctionne dans de bonnes conditions qu'à faible puissance. Au contraire, pour la marche en palier ou à régulateur fermé, les machines munies d'une distribution Bonnefond courent très bien, d'autant plus qu'elles sont munies de clapets de rentrée d'air placés sur les boîtes à vapeur.

D'ailleurs, on peut améliorer la marche à grande puissance en actionnant les tiroirs d'échappement, comme cela a du reste été fait, au moyen de cames qui leur permettent de s'ouvrir beaucoup plus rapidement et d'éviter ainsi les inconvénients résultant d'une contre-pression excessive.

Cette distribution présente des inconvénients pratiques assez sérieux, à ne pas mettre en ligne sa complication, sa délicatesse et la difficulté de son réglage, inconvénients qui ont été signalés et analysés par M. Guédon.

Les tiroirs d'admission, une fois ouverts, tendent à être ramenés dans leur position normale correspondant à la fermeture des lumières, par la différence des pressions agissant sur les faces des pistons de rappel, par l'action du tiroir TT′ et par la pression qui s'exerce sur le bout avant de la tige Y. Les forces qui tendent à s'opposer à ce mouvement, une fois que le déclic est dégagé, sont le frottement du tiroir sur sa table, le frottement du segment du piston de rappel dans son cylindre et celui de la partie arrière de la tige de tiroir dans sa garniture. Pour que la fermeture du tiroir soit assurée

suffisamment vite et avec certitude, il faut que la somme des premières forces soit notablement supérieure à celle des secondes. En moyenne, dans les conditions normales, le rappel est assuré par une force d'environ 25 kg.

Pour que le choc à bout de course du tiroir soit amorti convenablement, il faut que le segment du piston soit complètement étanche ainsi que la garniture de la partie arrière de la tige du tiroir. S'il n'en est pas ainsi, il se produit un choc violent et répété qui finirait par entraîner la rupture du tiroir et de la tige portant la touche I.

D'autre part, il peut arriver fréquemment que la garniture de la partie arrière de la tige du tiroir ait un peu trop de serrage; la résistance ainsi créée empêche le tiroir de se fermer. Cet inconvénient se produit plus particulièrement au moment du démarrage, quand toutes les pièces ne sont pas suffisamment réchauffées ou que le graissage est insuffisant. Le tiroir ne se fermant pas, la vapeur, une fois le régulateur ouvert, passe par l'orifice d'échappement après avoir traversé le cylindre et le démarrage ne peut se produire. Il arrive fréquemment paraît-il que le mécanicien est obligé de descendre de sa machine et d'agir avec une pince sur les tiges des tiroirs afin d'amener ces derniers à se fermer. Il en résulte parfois des retards au moment du démarrage et des difficultés continuelles dans les manœuvres de gare et pour mettre les machines sur un pont tournant par exemple, ce qui est une manœuvre délicate, demandant beaucoup de promptitude dans l'action de la distribution, la machine devant être mue à la fois d'une fraction de tour de roue seulement.

D'autre part, il peut aussi se produire des ratés à l'admission par suite d'une résistance excessive de la garniture, la touche du cliquet glissant alors sur celle du tiroir. Les ratés se produisent aussi quand les portées d'entraînement des touches sont un peu usées et arrondies par l'usage ou que les ressorts de rappel des cliquets ont perdu de leur élasticité.

Dans ces cas, les tiroirs ne découvrent plus les orifices; le piston, en se déplaçant, fait le vide derrière lui, pendant les périodes d'admission et de détente correspondant à la marche de ce tiroir. La pression d'échappement, qui règne sur l'autre face du piston, oppose ainsi à la marche de la machine une résistance sensible.

Au moment de l'avance à l'évacuation, il se produit une violente aspiration dans la boîte à fumée, et les gaz chauds de la combustion, mêlés à de la vapeur d'échappement, affluent dans le cylindre. Pendant la période d'échappement, ces gaz sont refoulés librement dans la cheminée; mais dès que se produit la période de compression, ils sont refoulés entre le piston et le fond du cylindre; ils s'échauffent considérablement et peuvent amener des grippages du cylindre, du piston, du tiroir d'échappement, des tiges et peu-

vent même faire fondre les garnitures de métal blanc dans leurs parties en contact avec ces dernières.

On voit donc que, malgré l'extrême ingéniosité déployée dans l'étude et l'application de cette distribution, il reste encore quelque chose à faire avant de l'amener au degré de perfection voulu pour qu'elle puisse se répandre et permettre d'assurer des services publics avec toute la régularité et l'exactitude nécessaires. Une grande partie des inconvénients révélés en service ont pu être atténués dans la suite, mais quelques-uns subsistent encore et paraissent inhérents aux systèmes à déclic.

Ces distributions ne paraissent pas offrir grand avantage pour les locomotives dans lesquelles la vitesse de piston est considérable. Il ne semble pas que la vitesse de fermeture des tiroirs, dont il faut vaincre l'inertie à chaque coup de piston, puisse être notablement plus grande, lorsque la machine est lancée à toute vitesse, que dans le cas des tiroirs invariablement liés à l'essieu et entraînés par des mouvements continus.

Les machines express des chemins de fer de l'*Etat*, munies d'une distribution Bonnefond, dépensent, d'après M. l'Ingénieur en chef Desdouits, 10 kg. de vapeur brute par cheval effectif à la jante tandis que les machines similaires à tiroirs ordinaires consomment de 11 à 12 kg. C'est une économie de vapeur de 17,5 0/0 qui doit être considérée comme exceptionnelle et ne saurait guère être atteinte que par de très bons mécaniciens.

Distribution Durant et Lencauchez. — La Compagnie d'*Orléans* a fait, depuis 1889, l'application à quelques-unes de ses locomotives des distributions du système de MM. Durant et Lencauchez successivement modifiées et améliorées d'après les résultats donnés en pratique. Le but cherché était de répondre en partie aux desiderata exposés plus haut, c'est-à-dire d'augmenter l'effet utile de la vapeur en prolongeant la détente et en réglant convenablement l'avance à l'échappement et la compression, en s'écartant le moins possible des errements suivis jusqu'ici dans la construction des locomotives, et sans employer aucun dispositif à déclic.

Les distributions en question s'effectuent au moyen de coulisses ordinaires et de tiroirs ou d'obturateurs, à glissement ou à rotation, reliés d'une manière invariable à l'essieu, et à mouvement continu, analogues sous certains rapports aux dispositifs Corliss sans déclic appliqués depuis quelques années aux machines fixes à grande vitesse.

Après un certain nombre de tâtonnements et d'essais d'application aux locomotives 67 et 76, décrits dans la note de M. l'Ingénieur en chef Polonceau citée plus haut, les inventeurs et la Compagnie ont adopté un type de distribution qui est appliqué, à l'heure où nous écrivons, à neuf machines à voyageurs et, sous une forme un peu différente, à trois locomotives à marchandises.

Chaque cylindre comporte quatre distributeurs cylindriques, genre Corliss, placés aux extrémités, deux d'entre eux servant pour l'admission et les deux autres pour l'échappement ; ils ont permis de réduire les espaces morts à 4 1/2 0/0 du volume du cylindre. Ces distributeurs sont à doubles orifices, de manière à diminuer le laminage. Les manivelles des distributeurs d'admission et d'échappement sont deux à deux reliées entre elles par une bielle et se meuvent par conséquent simultanément. Les tiroirs d'admission sont mus directement par une bielle, sur laquelle agit le relevage, et qui est articulée au coulisseau d'un secteur ordinaire du type Gooch. Les distributeurs d'échappement sont mus par une bielle commune articulée sur un balancier tournant autour d'un point fixe solidaire du cylindre et commandée à sa partie supérieure par une barre qui est actionnée par un coulisseau situé dans le même secteur, au-dessus du coulisseau d'admission auquel il est relié.

Pour la marche avant, le coulisseau des tiroirs d'émission se trouve plus éloigné du centre de la coulisse que celui des obturateurs d'admission ; les phases d'avance à l'échappement et de compression ont donc une durée moindre, pour un cran de marche donné, que si les deux bielles de tiroir se trouvaient articulées au même coulisseau. Le contraire a lieu pour la marche arrière qui se trouve sacrifiée, mais cela n'est pas un sérieux inconvénient pour une machine de grande ligne.

Dans l'application aux machines à marchandises, on a simplifié le mécanisme en supprimant le balancier de renvoi pour la commande des tiroirs d'échappement et en attaquant directement les tiroirs par les bielles articulées sur les coulisseaux.

On trouvera, dans le tableau ci-dessous[1], les éléments comparatifs de la distribution Durant et Lencauchez et d'une distribution ordinaire appliquée aux locomotives du même type de la Compagnie d'*Orléans :*

DURÉE DE L'ADMISSION	AVANCE A L'ADMISSION	AVANCE A L'ÉCHAPPEMENT ET COMPRESSION	
		SYSTÈME DURANT ET LENCAUCHEZ	SYSTÈME ORDINAIRE
Pour cent de la course.	Pour cent de la course.	Pour cent de la course.	Pour cent de la course.
4,5	4,5	25	50
15	1,5	17	35
20	1	16	31
30	0,8	13	25
40	0,5	11	20
50	0,4	8,5	16
60	0,3	7	12

[1] D'après M. J. Nadal.

L'échappement anticipé et la compression ont une durée à peu près moitié moins grande dans la nouvelle distribution qu'avec l'ancien système.

Il convient de signaler aussi que ces tiroirs cylindriques à rotation ayant une surface et une course très faibles, absorbent un travail de frottement notablement moins considérable que les tiroirs ordinaires. D'un autre côté ils présentent une étanchéité moins complète et des fuites se produisent souvent autour de leur tige malgré les précautions prises.

En somme, dans ce dispositif, les deux obturateurs supérieurs, reliés entre eux, jouent le rôle d'un tiroir d'admission partagé en deux portions reportées aux extrémités du cylindre pour réduire les espaces morts et les coudes des conduits. Il en est de même des deux obturateurs d'échappement.

On peut dire d'un tel système qu'il constitue une sorte de compromis entre la distribution Corliss à déclic et la distributiou par tiroir ordinaire. Il répond donc d'une manière peut-être moins complète à quelques-uns des desiderata auxquels on se propose de satisfaire; mais si l'avantage recueilli

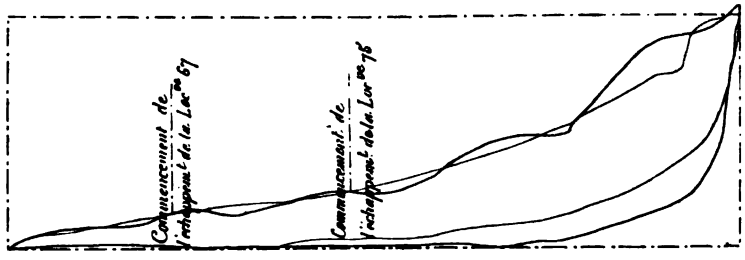


Fig. 273. — Diagrammes relevés à la vitesse de 70 kilomètres à l'heure.

est théoriquement un peu moindre, les inconvénients le sont aussi dans une plus large mesure. Les organes sont moins nombreux, plus robustes et plus faciles à régler; ils ne présentent pas pour les mécaniciens la nouveauté des distributions à déclic, d'ailleurs d'un emploi discutable pour ce genre d'application; enfin le démarrage est assuré comme avec les tiroirs ordinaires.

Le diagramme de la figure 273, extrait de la note de M. E. Polonceau, dans lequel le contour gras représente la courbe correspondant à la machine munie de la distribution Durant et Lencauchez et le trait fin à la distribution ordinaire montée sur une locomotive du même type, nous montre qu'en raison du laminage plus grand qui se produit dans le cylindre où la distribution est opérée par un tiroir ordinaire, la détente est aussi considérable au moins et que sa courbe est plutôt plus relevée vers la fin de la course; cela prouve que l'on ne gagne rien à réduire, par l'emploi du système perfectionné, la durée de l'échappement anticipé. Du côté de l'échappement, la comparaison est tout à l'avantage du système de MM. Durant et Lencauchez,

la compression se produit moins tôt et se trouve néanmoins aussi complète à cause du petit volume des espaces morts. Si donc il n'y a pas de gain apparent du côté de la détente, on doit constater un avantage certain au point de vue de l'augmentation du débit des cylindres à une vitesse donnée et de la puissance qu'il est possible de développer à grande vitesse avec un des cylindres de volume déterminé. Ainsi on a constaté que les machines munies de cette distribution franchissaient la rampe d'Etampes (8 mm. par mètre sur une longueur de 8 km. environ) à une vitesse dépassant, de 7 à 8 km. à l'heure, celle des machines ordinaires, avec une charge de 150 à 200 t.

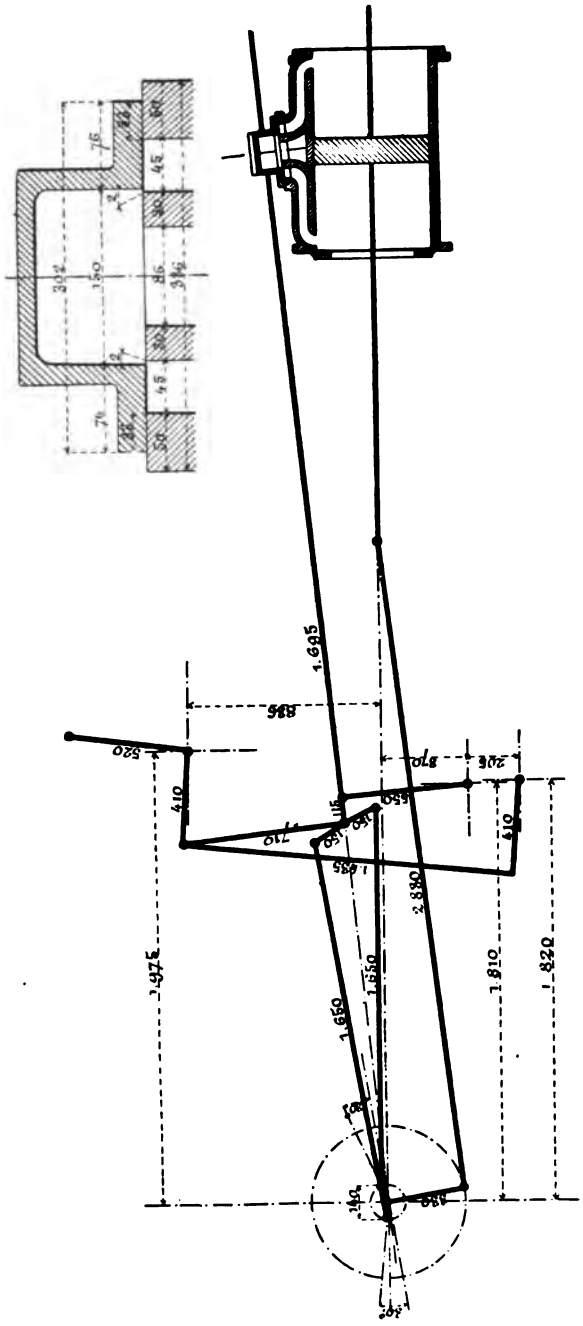


Fig. 274. — Schéma de la distribution, coulisses de Stephenson, des locomotives à grande vitesse (série 800) des *Chemins de fer de l'Est.*

Le mécanisme de cette distribution paraît se prêter très convenablement au service difficile et rude des locomotives. D'après M. l'Ingénieur en chef E. Polonceau, la locomotive 331 est rentrée aux ateliers de Paris après un parcours de 64 694 km. pour réparations d'entretien général. La visite des organes de la distribution a permis de constater que l'usure des tables était insignifiante, que les tiroirs présentaient une certaine usure, mais de belles surfaces frottantes. Les articulations avaient à peine pris du jeu et les colliers d'excentriques avaient le

même jeu que dans les locomotives ordinaires[1]. La machine a été remise en service sans réparations alors que la visite des tiroirs ordinaires, après des parcours moyens de 20 à 30 000 km., indique la nécessité d'opérer un dressage des glaces et surfaces frottantes.

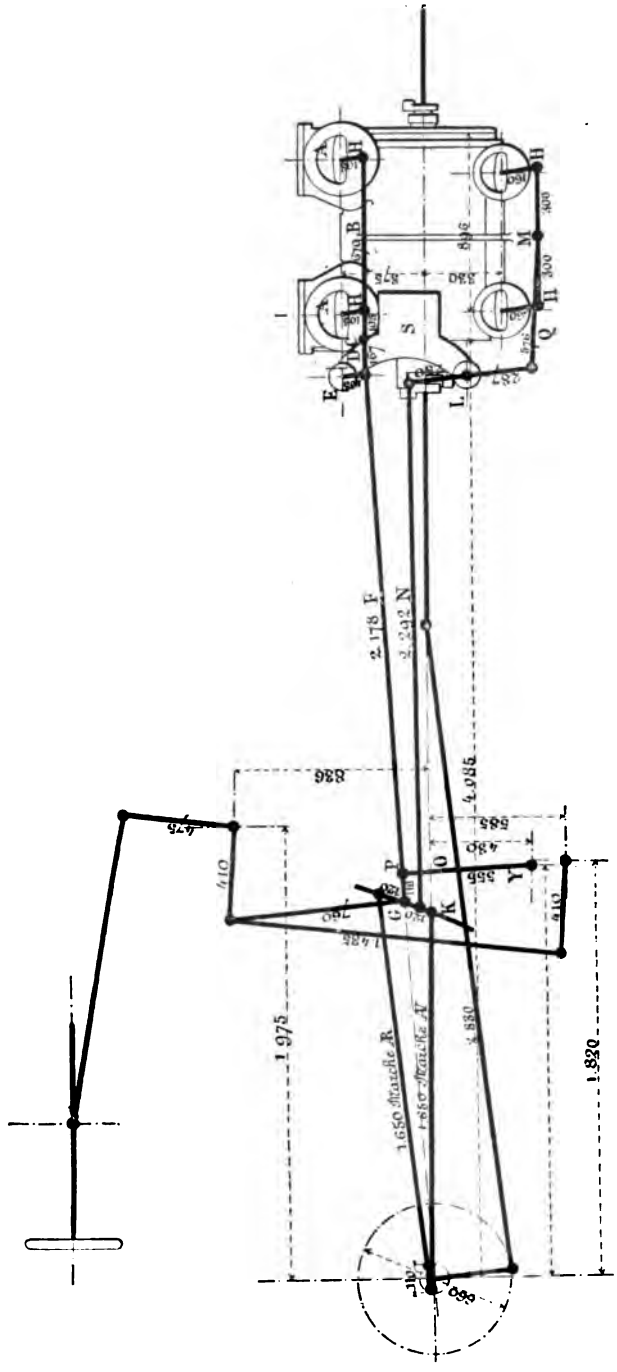


Fig. 275. — Schéma de la distribution Durant et Lencauchez appliquée aux locomotives à grande vitesse (833 et 834) des *Chemins de fer de l'Est*.

L'économie de combustible obtenue en service par cette même locomotive a été de 3,4 0/0 inférieure à la consommation de la machine à tiroirs ordinaires qui figure la première de son espèce sur la liste de classement, et de 15,2 0/0 à la moyenne.

Avant l'application de la distribution, la machine 331 était classée vingt et unième alors que le mécanicien qui en était titulaire lors des essais, avait antérieurement un rang moyen correspondant à la cinquième place.

La dépense de graissage a été un peu supérieure à celle des autres locomotives : 51 gr. par km. au lieu de 42 gr.

La Compagnie de l'*Est*, a appliqué en 1895, à deux de ses locomotives express du nouveau type (Mach. 833 et 834), la distribution du système

[1] Ce fait ne semble pas prouver que la réduction du travail de frottement absorbé par les tiroirs soit bien sensible.

Durant et Lencauchez (fig. 275 à 277). Nous en donnerons une description d'après une note qu'a bien voulu nous communiquer M. l'Ingénieur en chef Salomon.

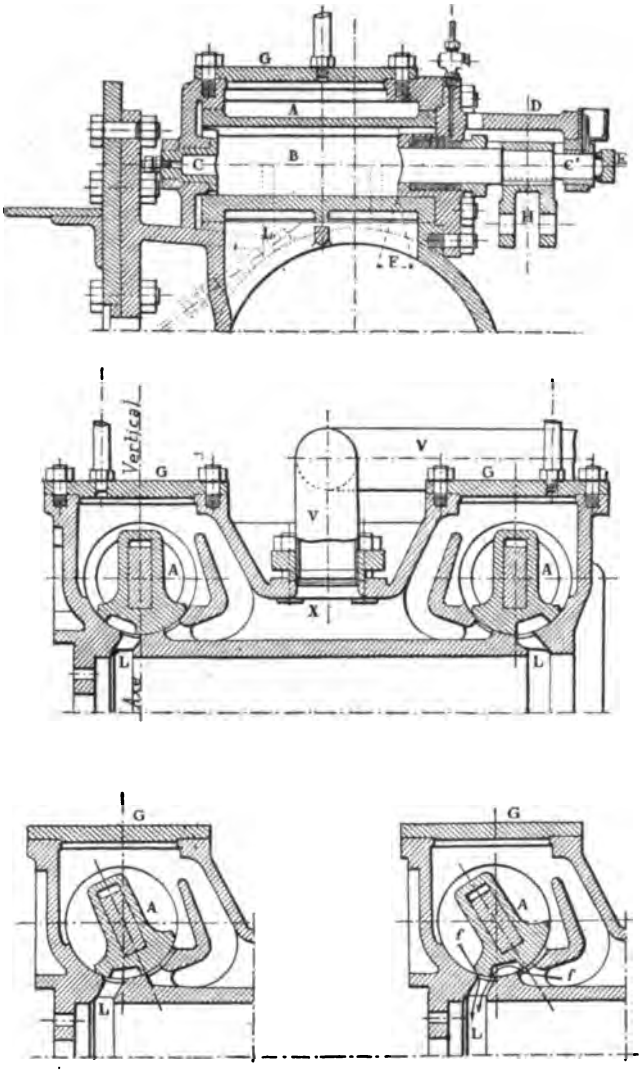


Fig. 276. — Distribution Durant et Lencauchez. Détail des obturateurs d'admission.

A la partie supérieure du cylindre (fig. 276) et à chacune de ses extrémités se trouve un boisseau, en partie cylindrique, venu de fonte avec le corps du cylindre, en communication, d'une part, avec la boîte à vapeur X où la vapeur est amenée par le tuyau V, et, d'autre part, avec l'extrémité du cylindre par la lumière L.

Sur la partie inférieure du boisseau, où débouche la lumière L, repose en faisant joint sous la pression de la vapeur qui remplit la boîte X, le tiroir distributeur d'admission en bronze, A, qui est animé, par le mécanisme, d'un mouvement oscillatoire circulaire et qui vient ainsi tour à tour masquer et découvrir la lumière L.

Un arbre en acier, B, à section rectangulaire sur une partie de sa longueur, est engagé dans un logement à section également rectangulaire ménagé à cet effet sur la longueur du tiroir distributeur et lui transmet un mouvement de rotation alternatif. Un jeu suffisant, réservé à la partie supérieure du logement de l'arbre, dans le tiroir, permet à celui-ci de se déplacer dans la direction normale à la surface de frottement, de manière que, malgré l'usure, il reste toujours appuyé par la pression de la vapeur sur la table cylindrique de la lumière.

L'arbre B du distributeur tourne dans les supports de tourillons C et C'

formés : le premier, par une bague en bronze rapportée sur le fond postérieur du boisseau, le second par un support en porte à faux venu de fonte avec le plateau de fermeture D du boisseau du distributeur et garni également d'une bague en bronze qu'un graisseur à mèche lubrifie. L'arbre B sort du boisseau du distributeur à travers une boîte à garniture métallique ménagée dans le couvercle D qui ferme la partie extérieure du boisseau.

Le support du tourillon C' est complété par une butée E en acier trempé contre laquelle doit venir s'appuyer l'extrémité de l'arbre B poussé par la pression de la vapeur ; un trou de graissage a été ménagé sur la pièce formant butée.

L'arbre B reçoit son mouvement de la manivelle H clavetée vers son extrémité. Il est utile de noter ici que lorsque la manivelle H est verticale, la lumière d'admission au cylindre est fermée.

Dans la coupe, la lumière est sur le point de s'ouvrir ou vient de se fermer.

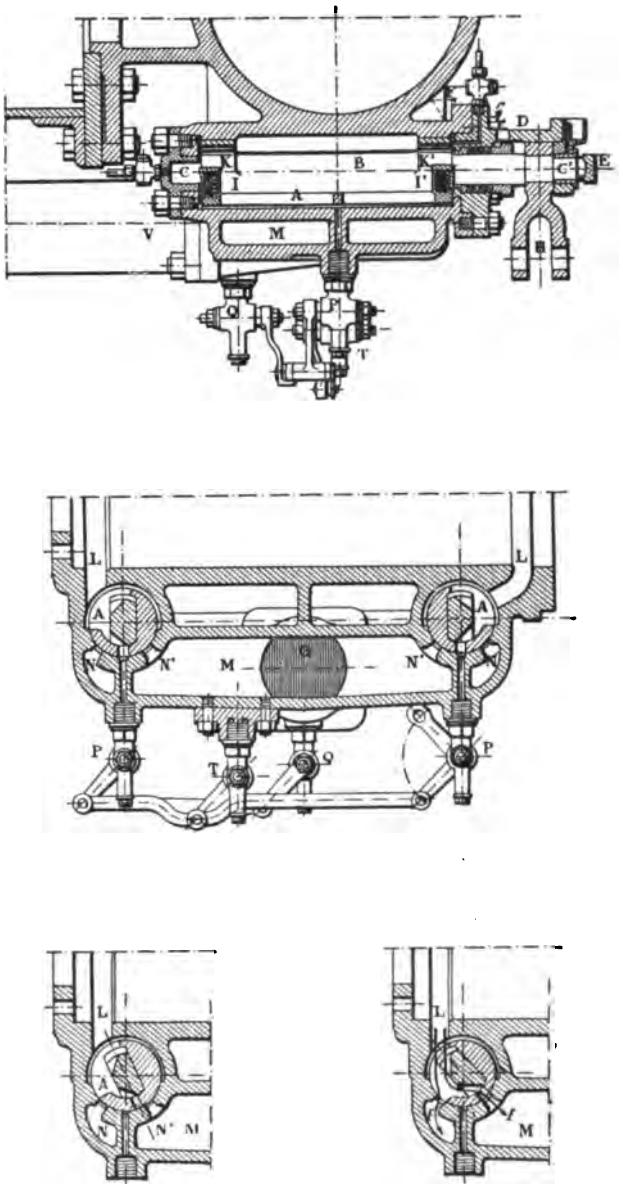


Fig. 277. — Distribution Durant et Lencauchez. Détail des obturateurs d'échappement.

La coupe est faite pour une position de la manivelle dans laquelle la lumière est ouverte ; elle montre que la vapeur pénètre dans le cylindre par deux orifices en suivant la direction des flèches *f* et *f'*.

A la partie inférieure du cylindre (fig. 277) et à chacune de ses extrémités,

se trouve un boisseau cylindrique en communication, par la lumière L, avec l'extrémité du cylindre et, par les ouvertures N et N', avec une cavité M qui communique avec l'échappement par l'orifice G et le tuyau V ; enfin, le robinet purgeur P est vissé à l'extrémité d'un canal aboutissant à la partie inférieure du boisseau d'échappement dans une rainure qui se prolonge au delà des deux extrémités du tiroir et par conséquent en communication constante avec le cylindre.

La cavité M, intermédiaire entre le boisseau d'échappement et la conduite d'échappement V, est aussi munie d'un purgeur dont l'ouverture et la fermeture se produisent en même temps que celle du purgeur P et au moyen du même mécanisme. Il en est de même d'un quatrième robinet purgeur T placé à l'extrémité d'une conduite qui aboutit d'autre part au point le plus bas de la boîte à vapeur X et destiné à purger cette boîte de la vapeur condensée à la mise en marche ou pendant les arrêts.

Un tiroir cylindrique en fonte A repose sur la partie inférieure du boisseau; il est animé par le mécanisme, comme les distributeurs d'admission, d'un mouvement circulaire oscillatoire et vient tour à tour masquer ou découvrir les lumières N et N' de communication du cylindre avec l'échappement.

Le tiroir d'échappement est commandé par un arbre présentant en K et K' une section rectangulaire qui est réduite autant que possible entre ces deux points pour ne pas gêner l'écoulement de la vapeur ; cet arbre entraîne le tiroir au moyen de deux logements ménagés dans celui-ci à ses deux extrémités et correspondant aux deux parties K et K'. Un jeu suffisant réservé entre le dessus de l'arbre et la partie supérieure de ces logements laisse au tiroir toute liberté de s'appliquer malgré l'usure sur la table des lumières du boisseau.

La pression de la vapeur venant du cylindre et pénétrant dans le tiroir lorsque le régulateur est ouvert, et deux ressorts I et I' logés dans deux cavités ménagées dans l'arbre B, pressent le tiroir contre la table des lumières d'échappement et assurent le joint.

L'arbre B du tiroir d'échappement tourne dans les supports de tourillons C et C', traverse une boîte à garniture ménagée dans le couvercle D et vient s'appuyer contre une butée E, absolument comme pour les distributeurs d'admission.

L'arbre B reçoit son mouvement de la manivelle H clavetée vers son extrémité.

Nous avons dit que les quatre tiroirs d'admission et d'échappement étaient animés d'un mouvement oscillatoire circulaire autour de leur axe ; ce mouvement leur est imprimé par l'intermédiaire de leviers de renvoi et de bielles (fig. 275) qui sont actionnés par une coulisse de Stephenson suspendue en son milieu au levier de renvoi d'un changement de marche à vis du type

usuel et recevant, comme d'ordinaire, son mouvement de poulies d'excentriques calées sur la fusée-manivelle de la roue motrice.

Cette distribution est à barres croisées, c'est-à-dire que la barre d'excentrique de marche AV est articulée à la partie inférieure de la coulisse et celle d'AR à sa partie supérieure.

On a vu que chaque arbre de commande des tiroirs porte, calée vers son extrémité, une manivelle H ; les deux manivelles des deux tiroirs d'admission A et A' sont reliées entre elles par une barre B. Cette barre est articulée à son extrémité C sur une bielle de peu de longueur D, reliée par son autre extrémité à l'un des leviers d'un arbre E, dont le second levier reçoit, par la bielle F, le mouvement du coulisseau G actionné par la coulisse K.

L'arbre E est porté par deux supports fixés au cylindre, l'un sur sa face arrière, l'autre formé par l'une des branches du support double S fixé sur la paroi extérieure du cylindre.

Les deux leviers de l'arbre E étant dirigés dans le même sens, le mouvement des tiroirs d'admission est de même sens que celui du coulisseau.

La bielle F qui transmet à l'arbre de renvoi E le mouvement du coulisseau est soutenue, par son point P, à l'extrémité d'une bielle O articulée à un point fixe Y. Le coulisseau G est donc suspendu par l'intermédiaire de la bielle F.

Le mécanisme de commande des tiroirs d'échappement est constitué de la même façon que celui des tiroirs d'admission. Il n'y a de différence que :

1° Dans la position du point d'articulation de la bielle de commande P sur la barre qui réunit les manivelles H des deux tiroirs ; ce point d'articulation est, en effet, placé au milieu M de la barre au lieu de se trouver sur son prolongement ;

2° Dans la disposition des deux leviers de l'arbre de renvoi L qui sont de sens opposé, de telle façon que le mouvement des deux tiroirs d'échappement est de sens inverse de celui du coulisseau G et, par suite, de celui des tiroirs d'admission correspondants.

Le mouvement de la coulisse K est transmis à l'arbre L par la bielle N articulée par son autre extrémité à la partie inférieure du coulisseau G qui actionne déjà les tiroirs d'admission, et à une distance de 80 mm. en dessous du point de ce coulisseau qui commande les tiroirs d'admission.

La distribution étant, comme nous l'avons dit, du type à barres croisées, c'est à la partie inférieure de la coulisse qu'est articulée la barre d'excentrique de la marche en avant, et c'est la moitié inférieure de la coulisse qui produit la distribution de la vapeur pour la marche en avant. Le point du coulisseau qui commande les tiroirs d'échappement est donc placé plus près de l'extrémité de la coulisse que celui qui commande les tiroirs d'admission.

C'est de cette position relative dans la coulisse des points d'articulation des

Comparaison des phases de la distribution (système Durant et Lencauchez) de la locomotive n° 834, avec celles de la distribution des locomotives n°s 825 à 832, 835 à 840 munies de la distribution ordinaire.

PHASES de LA DISTRIBUTION			MARCHE AVANT — CRANS DE MARCHE EN CENTIÈMES DE LA COURSE DU PISTON														MARCHE ARRIÈRE — CRANS DE MARCHE en centièmes de la course du piston.			
			12 p. 100		20 p. 100		30 p. 100		40 p. 100		50 p. 100		60 p. 100		72 p. 100		40 p. 100		71 p. 100	
			Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.		Locomotives.	
			834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840	834	825 à 832 835 à 840
Admission			12,0	12,0	20,0	20,0	30,0	30,0	40,0	40,0	50,0	50,0	60,0	60,0	72,0	72,0	40,0	40,0	71,0	71,0
Détente			70,9	41,0	66,3	42,3	58,9	40,0	50,6	36,0	42,0	31,1	33,2	25,6	22,4	18,3	11,0	35,5	9,6	18,6
Echappement anticipé			17,1	47,0	13,7	37,7	11,1	30,0	9,4	24,0	8,0	18,9	6,8	14,4	5,6	9,7	49,0	24,5	19,4	10,4
Echappement			74,4	58,0	79,0	66,9	83,0	74,1	85,7	79,4	87,9	84,0	89,8	87,9	91,9	92,3	39,0	79,1	73,6	91,9
Compression			14,9	35,3	14,2	29,4	13,0	23,8	11,5	19,3	10,0	15,3	8,5	11,7	7,1	7,5	57,8	19,6	24,2	8,0
Contre-vapeur			10,7	6,7	6,8	3,7	4,0	2,1	2,8	1,3	2,1	0,7	1,7	0,4	1,0	0,2	3,2	1,3	2,2	0,1
Admission.	avance linéaire.	*a.* mm.	8,7	7,2	8,8	7,2	9,0	7,0	9,5	6,7	10,0	6,1	11,2	5,1	14,1	3,9	10,2	6,2	14,5	3,2
		b. —	13,7	7,2	13,8	7,2	14,2	7,0	14,9	6,7	16,0	6,1	18,4	5,1	24,5	3,9	16,5	6,2	25,1	3,2
	ouverture maxima.	*a.* mm.	8,7	7,7	9,4	9,0	11,7	10,6	15,3	13,0	20,0	17,0	27,3	22,0	45,1	30,0	14,8	14,0	42,7	30,6
		b. —	13,7	7,7	15,0	9,0	19,6	10,6	26,1	13,0	26,1	17,0	27,3	22,0	43,4	30,0	25,9	14,0	42,7	30,6
Echappement.	avance linéaire.	*a.* mm.	13,9	42,2	14,3	42,2	14,9	42,0	15,3	41,7	15,7	41,1	16,2	40,1	17,5	38,9	14,8	41,2	15,6	38,2
		b. —	28,6	42,2	29,1	42,2	30,7	42,0	31,4	41,7	32,3	41,1	33,0	40,1	35,7	38,9	30,8	41,2	32,0	38,2
	ouverture maxima.	*a.* mm.	18,0	42,7	19,8	44,0	22,4	45,6	25,0	48,0	28,3	52,0	32,0	57,0	40,0	65,0	15,4	49,0	18,4	65,8
		b'. —	36,6	42,7	37,8	44,0	35,7	45,0	33,0	45,0	29,8	45,0	26,0	45,0	20,1	45,0	31,7	45,0	31,9	45,0

a. Distance des arêtes principales des tiroirs et des lumières.
b. Ouvertures réelles (en tenant compte de la double entrée pour la locomotive n° 834).
b'. Ouvertures réelles (en tenant compte de la double sortie pour la locomotive n° 834).

deux bielles F et N que résultent les avantages invoqués en faveur de la nouvelle distribution. On sait, en effet, que dans les distributions ordinaires par coulisse, c'est au voisinage du milieu de la coulisse que le coulisseau se trouve placé pour les crans ordinaires de marche, et que, avec une coulisse unique, les périodes d'échappement anticipé et de compression atteignent des valeurs d'autant plus grandes que le coulisseau est plus rapproché du milieu de la coulisse. Or, en écartant le point qui commande l'échappement de celui qui commande l'admission et en le rapprochant de l'extrémité de la coulisse, on combine les faibles admissions de la marche normale avec les faibles échappements anticipés et les compressions non exagérées qui correspondent dans la coulisse ordinaire aux crans des fortes admissions.

Ces avantages sont réalisés de la façon la plus simple par la disposition adoptée par MM. Durant et Lencauchez, mais au détriment de la marche en arrière, puisque, pour celle-ci, les positions relatives dans la coulisse des deux points de commande des tiroirs seraient absolument l'inverse de ce qu'elles devraient être pour réaliser les avantages dont il s'agit. Elle ne s'applique d'une façon rationnelle qu'à des locomotives marchant ordinairement en avant ; pour des locomotives devant marcher indifféremment dans les deux sens, il faudrait recourir à une disposition plus compliquée, par exemple à l'emploi de deux coulisses et de deux appareils de relevage distincts.

Quelque ingénieuses que soient ces diverses solutions, on est en droit de les trouver un peu compliquées. Au contraire, les tiroirs cylindriques, actionnés par des coulisses ordinaires, s'ils ne modifient en rien les phases de la distribution, outre qu'ils sont compensés, permettent de reporter vers les bouts du cylindre les conduites de vapeur et de leur donner une faible longueur en même temps qu'une forme rectiligne, ce qui diminue l'action du laminage et la contre-pression. Ils constituent une solution, seulement partielle mais très simple du problème, et sont l'objet d'une faveur croissante. Ils sont appliqués à un grand nombre de locomotives de l'*Etat français* et ont été essayés sur d'autres réseaux. A l'étranger, on les retrouve sur des locomotives du *North Eastern* et du *Caledonian* (Grande-Bretagne), de plusieurs administrations allemandes et autrichiennes et sur environ 1 000 locomotives aux Etats-Unis. Nous croyons beaucoup à leur avenir.

III

SYSTÈME COMPOUND

107. Dans les machines compound ou à expansion fractionnée on limite, dans un premier cylindre recevant seul la vapeur des chaudières, le degré

de détente et la transformation du calorique en travail, ce qui diminue la perte par la conductibilité intérieure dans ce premier cylindre. La vapeur qui s'en échappe, composée de la fraction qui n'a pas été condensée et de celle qui a été réévaporée pendant la détente dans ce cylindre, est ensuite dirigée à l'intérieur d'un second cylindre, de plus grand volume, où elle continue à se détendre et à produire un travail utile.

Le nombre de cylindres ainsi disposés en série peut être indéfini; plus il sera considérable, plus les pertes par échange intérieur de calorique seront faibles. Toutefois, ce système donnant naissance à des pertes propres qui pourraient, si l'on poussait les choses à l'extrême, contre-balancer les avantages du mode compound, on reconnaît nécessaire de limiter le nombre de « cascades » à un chiffre déterminé que l'expérience a fixé.

En ce qui concerne les locomotives, qui fonctionnent sans condensation et où par conséquent les écarts de température à l'intérieur des cylindres sont moins élevés, on se contente, lorsque l'on y fait l'application de ce mode de détente, de la double expansion.

L'origine de la machine compound à réservoir est aujourd'hui assez contestée, il nous suffira de rappeler qu'elle est en somme directement issue de la machine de Woolf, contemporaine de Watt, et que son emploi fréquent dans la marine est antérieur à 1865.

On ne doit pas, à la vérité, dans l'étude des lois qui président au fonctionnement de ces machines, établir de distinction entre les appareils compound et les machines à triple ou à quadruple expansion, qui n'en sont que le développement et satisfont aux mêmes relations dans lesquelles elles entrent simplement avec un exposant différent.

Il est facile de montrer comment on peut passer de la machine monocylindre à la machine compound simple, et de celle-ci aux appareils plus complexes du même système.

On sait que, dans la machine monocylindre, la valeur du rapport de détente le plus économique est limitée à un chiffre assez bas. Si l'on veut profiter des avantages thermonynamiques que présenterait la vapeur à une pression supérieure en adoptant une détente plus grande, il devient nécessaire, toutes choses égales d'ailleurs, de fractionner cette détente en deux expansions, opérées dans deux cylindres de volumes diéffrents, disposés en série. On donnera ainsi naissance à la machine compound. La détente totale pourra être de six volumes et, sans que nous nous soyons écartés des conditions thermiques normales, nous aurons profité d'une utilisation thermodynamique supérieure, puisque la chute totale de température est plus grande sans qu'il y ait un accroissement disproportionné des pertes internes. De là un gain évident et réel.

Par un raisonnement semblable, on passerait à la machine à triple, puis à

quadruple expansion. Autrement dit, les appareils à détente fractionnée permettent d'obtenir une détente et une chute de température totales plus grandes, par conséquent un rendement thermodynamique supérieur, tout en limitant les condensations intérieures qui résulteraient d'une détente de même rapport, opéré dans un cylindre unique.

L'économie des machines monocylindres recevant de la vapeur saturée, sèche ou humide mais non surchauffée, est forcément limitée puisque ces appareils ne peuvent utiliser convenablement la vapeur dans les cas où celle-ci présenterait un rapport thermodynamique élevé, c'est-à-dire quand la pression initiale et l'écart total de température seraient considérables.

Le bénéfice dérivé de l'application du mode compound peut d'ailleurs se représenter graphiquement comme nous l'avons montré dans notre *Traité de la Construction des Machines à vapeur* [1] auquel nous renvoyons.

(I) Les écarts de températures, dans chaque cylindre, sont moindres, par suite du fractionnement de la détente.

(II) La somme des produits de la surface intérieure de chacun des cylindres, exposée à l'échauffement et au refroidissement alternatifs, par l'écart maximum des températures qui s'y produit est inférieure au produit de la surface correspondante et de l'écart de température à l'intérieur de la machine monocylindre [2] et de la même puissance.

(III) La vapeur, due à la réévaporation de l'eau condensée dans le premier cylindre, se détend dans le second.

Ce système présente aussi des avantages d'*ordre mécanique*, dérivés des précédents, à savoir :

a. Plus grande régularité des efforts moteurs provenant de ce que, la période d'admission étant plus prolongée à l'intérieur de chaque cylindre que dans les machines à simple expansion, la différence entre les pressions effectives sur les pistons, au commencement et à la fin de la course, est moins grande. Par conséquent, pour une même pression moyenne, les efforts initiaux se trouveront moins considérables, d'où diminution de fatigue des organes, articulations et surfaces frottantes.

b. Diminution du frottement des tiroirs par suite de la réduction des pressions effectives auxquelles ils sont soumis, pouvant entraîner une légère augmentation de l'utilisation mécanique et une diminution de la fatigue et de l'usure des organes de la distribution.

Dans les machines à double expansion, la vapeur vive venant de la chaudière est admise à l'intérieur d'un premier cylindre appelé *cylindre à haute*

[1] Baudry et Cie, 1894.

[2] Dans notre étude sur les Machines compound, parue en 1885, nous avions donné le nom de « pouvoir condensant » à chacun de ces produits $S(T-t)$, $S'(t-t')$, etc.

pression ou *petit cylindre*, où la période d'admission est prolongée pendant une fraction assez grande de la course, de 0,40 à 0,70 par exemple ; elle commence donc à s'y détendre. Après son échappement, qui se produit à une pression encore considérable, elle se rend dans un second cylindre plus volumineux, appelé *grand cylindre*, *cylindre de détente* ou à *basse pression*, à l'intérieur duquel la période d'admission est également assez considérable et où elle achève de se détendre.

Dans les machines *Woolf*, les pistons de ces deux cylindres, placés côte à côte ou dans le prolongement l'un de l'autre, restent solidaires et se meuvent ensemble, parallèlement. Lorsque les cylindres sont placés dans le prolongement l'un de l'autre, les pistons sont montés sur une tige commune et la machine est dite du système *tandem*. Le système Woolf est un peu moins économique que le système compound proprement dit parce que, le petit cylindre restant en communication avec l'intérieur du grand pendant toute sa période d'échappement, l'écart des températures y est plus considérable.

Les locomotives ayant nécessairement deux manivelles au moins, le système tandem, quand il leur est appliqué, entraîne l'emploi de quatre cylindres, deux à haute et deux à basse pression.

Dans le système *compound à réservoir*, les cylindres à haute et à basse pression appartiennent à deux groupes distincts dont les manivelles sont calées entre elles à un certain angle. L'échappement du petit cylindre s'effectue dans une capacité en communication avec la boîte à tiroir du grand cylindre, portant le nom de *réservoir intermédiaire* et dont le volume doit être assez considérable pour que la pression n'y subisse pas d'importantes variations au cours des différentes phases de la distribution dans les deux cylindres, soit que la vapeur d'échappement du cylindre à haute pression y afflue, soit que, l'admission étant ouverte au grand cylindre, la vapeur du réservoir s'écoule vers ce dernier. L'avantage de ce dispositif est, on le comprend de suite, de réduire la chute de pression au petit cylindre dont l'échappement s'effectue à l'intérieur du réservoir où la pression est toujours égale ou supérieure à la pression d'admission au grand cylindre. En outre, un tel mécanisme, composé de deux cylindres commandant deux manivelles calées à 90°, constitue pour la locomotive un appareil moteur complet en lui-même. C'est la forme la plus simple que l'on puisse donner à une machine compound.

Dans beaucoup d'applications, on fractionne soit le petit, soit le grand cylindre, soit les deux cylindres à la fois. Ainsi, il existe des compound à trois cylindres, comprenant : un cylindre d'admission et deux cylindres de détente recevant à la fois la vapeur d'échappement du premier, ou bien deux cylindres d'admission et un cylindre de détente unique. D'autres sont à quatre cylindres, dont deux à haute et deux à basse pression. Dans les locomotives,

les bielles, commandées par trois ou quatre pistons, peuvent actionner soit le même essieu, soit deux essieux différents accouplés ou non accouplés.

108. Historique succinct de l'application du mode compound aux locomotives. — Dès l'année 1834, des brevets avaient été pris, en France, par la maison André Kœchlin, de Mulhouse, et en Angleterre, par Ernest Woolf, pour une machine expansive à cylindres indépendants et combinés, inventée par l'ingénieur hollandais Rœntgen[1]. Bien que les deux brevets fassent également mention des avantages que pouvait offrir l'application de cette invention aux chemins de fer, on ne peut faire remonter à cette date l'origine de la locomotive compound d'autant plus que l'emploi de la détente en cylindres conjugués n'aurait donné aucun résultat, dans un temps où les locomotives fonctionnaient à de faibles pressions, de 4 à 5 kg. au plus. D'ailleurs, à cette époque, la locomotive était encore à étudier dans ses grandes lignes et l'on avait plus à faire qu'à lui appliquer des dispositifs d'importance alors secondaire. On ne saurait non plus considérer, comme une tentative sérieuse d'application du principe compound à la locomotive, le système dit à expansion continue de Samuel et Nicholson, expérimenté, en 1850, sur deux locomotives (*Eastern Counties Ry*).

C'est en 1876 que furent mises en service, sur la ligne de Bayonne à Biarritz, les premières locomotives à double expansion, à deux cylindres extérieurs; ces machines, au nombre de trois, qui furent construites sur les plans et d'après les brevets de M. A. Mallet, lequel doit être considéré comme le véritable promoteur de la locomotive compound, étaient à quatre roues accouplées. Ce sont, avec les machines à trois essieux accouplées construites pour la même ligne, les plus anciennes locomotives compound qui aient été en service régulier; elles étaient munies de valves de démarrage non automatiques.

Le succès obtenu par les locomotives compound à deux cylindres du système Mallet détermina un certain nombre de Compagnies à faire des essais avec des machines soit du système Mallet, soit d'un des autres systèmes auxquels ce dernier donna naissance, et dont les plus connus en Europe sont ceux de MM. von Borries, Worsdell, Lindner, Urquhart, Borodine, Gölsdorf, etc.

M. von Borries, ingénieur aux chemins de fer de l'*État de Hanovre*, fit construire, en 1880, par l'usine Schichau, d'Elbing, deux machines compound légères, pour trains omnibus; puis, en 1882, deux locomotives compound à six roues accouplées; et enfin, en 1884, des machines express, munies d'une valve de démarrage automatique, que son auteur a modifiée, à plusieurs

[1] *Développement de l'application du système compound aux locomotives*, par A. Mallet.

reprises, avant d'adopter définitivement un système non automatique. En 1884, M. Worsdell, alors ingénieur en chef au *Great Eastern Ry*, construisit une machine express compound à deux cylindres intérieurs et à bogie; c'est le système aujourd'hui appliqué, avec quelques modifications, à quelques locomotives à voyageurs et à marchandises du *North Eastern Ry*. La valve de démarrage étudiée par M. Worsdell est semi-automatique, car le déplacement automatique de la valve de communication des deux cylindres ne peut s'effectuer qu'après que le mécanicien a remis en place un levier qu'il avait dû manœuvrer, au moment du démarrage, pour admettre directement, dans le grand cylindre, la vapeur venant du régulateur.

Un ingénieur de l'*État saxon*, M. Lindner, a breveté, vers la même époque, une valve non automatique, déterminant l'admission de la vapeur vive dans la boîte du tiroir à basse pression, quand le changement de marche est placé à fond de course, soit à l'avant, soit à l'arrière.

M. Urquhart, ingénieur en chef du chemin de fer du *Sud-Est russe* (*Griazi Tsaritzin*), a transformé, en 1887, une locomotive ordinaire à marchandises à 3 essieux couplés en compound à 2 cylindres. Le mode compound a été étendu, depuis, à un grand nombre de machines de ce réseau, munies par M. Urquhart de tiroirs à basse pression équilibrés, de soupapes de rentrée d'air, et d'une valve de démarrage très simple, non automatique. C'est également au type à deux cylindres qu'appartiennent les machines à voyageurs et à marchandises construites, pour les chemins de fer de l'*État autrichien*, par les ateliers de Florisdörf; ces locomotives sont munies de la valve de démarrage imaginée par M. Gölsdorf : cet appareil automatique se rapproche du système Lindner, dont il diffère toutefois par quelques points.

Nous citerons pour mémoire la disposition appliquée par M. Middelberg à quatre machines de la *Compagnie royale du chemin de fer hollandais* construites, en 1888, par l'usine Borsig, de Berlin; dans ces machines, l'auteur avait augmenté la course du cylindre à basse pression, afin de lui donner un volume suffisant tout en conservant le même diamètre que pour le cylindre à haute pression.

Parmi les applications les plus récentes du système compound à deux cylindres, nous citerons en Europe la locomotive à trois essieux accouplés et à cylindres intérieurs de la *Compagnie de l'Est*, et les locomotives à quatre essieux accouplés de l'*État prussien*, construites sur les plans de M. von Borries.

Aux États-Unis, où l'on n'a guère commencé à étudier sérieusement l'application du principe compound aux locomotives que vers 1889, on trouve un assez grand nombre de dispositifs à deux cylindres, parmi lesquels nous citerons en premier lieu ceux de M. Pitkin (*Schenectady Locomotive Works*), de Rogers et de Player (*Brooks Locomotive Works*). Tous trois

comportent un système de démarrage et une valve interceptrice automatiques, sans échappement à l'air libre pour le petit cylindre. La plupart des locomotives compound à deux cylindres construites en Amérique sur d'autres systèmes sont munies d'une valve interceptrice et d'un échappement direct pour le petit cylindre ; c'est à cette catégorie qu'appartiennent les systèmes Batchellor (*Rhode Island Locomotive Works*), Mellin (*Richmond Locomotive Works*), Colvin (*Pittsburgh Locomotive Works*). Le *Pensylvania Rd* et le *Chicago Burlington and Quincy Rd* ont fait construire quelques locomotives des systèmes Lindner et von Borries.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que des machines à deux cylindres ; nous allons maintenant nous occuper successivement des locomotives à trois et à quatre cylindres qui se sont développées simultanément. M. J. Morandière a publié en 1876, dans l'*Engineering*, le projet d'une locomotive compound à trois cylindres, comportant deux groupes moteurs de deux essieux accouplés. Le groupe avant était actionné par deux cylindres à basse pression, et celui arrière par un cylindre à haute pression. Ce projet ne fut jamais exécuté, non plus que celui de M. Andrade qui proposa, en 1876, d'employer, pour le chemin de fer de *Bayonne à Biarritz*, des machines compound à trois cylindres, dont un cylindre intérieur à haute pression et deux cylindres extérieurs à basse pression, commandant un essieu moteur unique au moyen de manivelles calées à 120° suivant le dispositif introduit dans la Marine par Dupuy de Lôme.

En 1881, l'usine Struwe, à *Kolomna* (Russie), exécuta une locomotive compound à trois cylindres, qui donna des résultats médiocres ; un cylindre central à haute pression et deux cylindres extérieurs à basse pression attaquaient le même essieu ; les manivelles extérieures, correspondant aux cylindres de détente, parallèles entre elles, étaient calées à 90° par rapport au coude central.

En 1878, M. Webb, ingénieur en chef du *London and North Western Ry*, transforma en compound à deux cylindres, d'après le système Mallet, une locomotive d'un ancien type à roues libres. Les résultats économiques obtenus ayant été satisfaisants, M. Webb, qui avait en vue la suppression des bielles d'accouplement pour les machines express, fut amené à créer un dispositif compound à trois cylindres qu'il appliqua, dès 1881, à une locomotive à voyageurs : l'*Experiment*, suivie de plusieurs autres du même type. Deux cylindres égaux à haute pression, placés au milieu, actionnaient l'essieu arrière ; un cylindre de détente unique, situé à l'avant entre les longerons, commandait l'essieu milieu ; l'avant était supporté par un essieu porteur à boîtes radiales.

Dans la suite, M. Webb transforma à titre d'essai, d'après son système, une machine-tender à bogie (1884) et en étudia un nouveau type, aussi à quatre roues accouplées, mais comportant un essieu radial à chaque extré-

mité ; puis il mit en service un type *Experiment* renforcé (1884) (machine express à quatre roues accouplées de 1,90 m, *Dreadnought Class*) ; puis un second type analogue monté mais sur des roues de 2,16 m. (*Teutonic Class*), qui figurait à l'Exposition d'Edimbourg, puis en 1890, un autre modèle (*Jeannie Deans*), auquel il appliqua pour la première fois pour le cylindre à basse pression un système de distribution à simple excentrique à toc, remplaçant la distribution Joy jusqu'alors usitée pour les trois cylindres. En 1891 parut le nouveau type *Greater Britain*, puis celui représenté par la *Queen Empress* (1893) qui, plus puissants que les précédents, sont portés par quatre essieux, dont deux porteurs encadrant deux essieux moteurs indépendants ; la chaudière, d'un nouveau type, est très longue et comporte une chambre de combustion intermédiaire. Cette même chaudière a été utilisée pour la locomotive à huit roues accouplées construite, en 1893, par M. Webb, en vue de la traction des trains de marchandises de fort tonnage.

Les locomotives du type Webb ont été l'objet de quelques applications d'essai sur le continent européen et en Amérique ; mais le système à trois cylindres s'est jusqu'à présent peu développé (*Ouest* français, 1884 ; *Pensylvania* RR, 1886). La compagnie du *Nord* avait mis en service, en 1887, une locomotive compound à six roues accouplées, construite d'après les plans de M. Sauvage : un cylindre intérieur à haute pression actionnait l'essieu milieu, dont le coude était calé suivant la bissectrice de l'angle droit formé par les manivelles extérieures, que commandaient les cylindres extérieurs à basse pression.

Enfin, l'*Etat wurtembergeois*, le *Jura-Simplon* et le *Gothard* ont essayé ce système.

Divers dispositifs de locomotives compound à quatre cylindres ont été successivement proposés dès 1872 ; mais les premières applications ne furent réalisées que plus tard. Les essais portèrent d'abord sur des machines du type tandem ; des locomotives de ce type furent construites par le *Boston and Albany Rd* (1883), par le *North British* (*Niesbet*, 1886), par M. *Dean* (1887).

En France, M. du Bousquet étudia, en 1887, la transformation, en locomotives du type Woolf-tandem, des machines à huit roues accouplées du chemin de fer du Nord : les résultats obtenus furent assez concluants pour décider la mise en service d'un certain nombre de machines neuves du même type (1890).

C'est également le dispositif tandem qu'ont adopté les chemins de fer de l'*État hongrois* (1890) et du *Sud-Ouest russe*.

M. Mallet avait étudié, dès 1877, une machine compound à avant-train moteur articulé, comprenant quatre cylindres répartis en deux groupes et qui est décrite ailleurs.

La première locomotive de ce système fut construite, en 1887, par

M. Decauville pour une ligne à voie étroite; depuis lors, un grand nombre d'applications de ce dispositif ont été faites à des locomotives à voie étroite et à voie normale: les plus connues sont celles du chemin de l'Exposition de 1889 (voie de 0,60 m.), des chemins de fer *Départementaux* (voie de 1 m.) du *Central suisse*, de l'*Etat badois* et de la *Compagnie du Gothard* (voie normale) etc... Ces dernières machines, mises en service en 1891, possèdent deux groupes moteurs de trois essieux chacun.

La *Compagnie du Nord* a mis en service, en 1886, une machine compound à quatre cylindres avec réservoir intermédiaire étudiée par M. de Glehn. Dans cette machine à trois essieux dont deux moteurs non accouplés, les cylindres intérieurs, à haute pression, commandaient l'essieu moteur avant; les cylindres extérieurs, à basse pression, actionnaient l'essieu moteur arrière, Les bons résultats donnés par cette locomotive ont conduit la Compagnie du Nord à faire construire une série de machines à quatre cylindres, d'un type analogue mais plus puissant, étudié par MM. du Bousquet et de Glehn, qui est aujourd'hui employé par la *Compagnie du Nord* pour le remorquage de ses meilleurs express; cet exemple a été suivi par les *Compagnies du Midi* et de l'*Ouest*. Ce système a été aussi introduit sur les chemins de fer du *Gothard* et de l'*État badois*. Les cylindres à haute pression sont extérieurs et on a jugé nécessaire de rétablir l'accouplement.

Le système à quatre cylindres a également été appliqué, à partir de 1888, par la *Compagnie de Lyon*, à des machines express et à des machines à huit roues accouplées. Dans le type actuel de machine à grande vitesse de la *Compagnie de Lyon*, les cylindres à haute pression sont placés à l'extérieur et un bogie a été appliqué à l'avant; les roues motrices et accouplées, qui étaient encadrées par deux essieux porteurs dans les premières machines, ont été reportées vers l'arrière. Les machines à huit roues accouplées dérivent des anciennes machines à marchandises à simple expansion; les cylindres de détente ont été placés à l'extérieur.

En Amérique, le mode compound Woolf à quatre cylindres superposés deux à deux s'est beaucoup développé, surtout sous la forme du système dû à M. Vauclain, ingénieur de la maison Baldwin, à Philadelphie. L'invention de ce dispositif peut être attribuée à un Français, M. Maximin Jouffret, qui la fit breveter en décembre 1882; la première application, par la maison Baldwin, à une locomotive du *Baltimore and Ohio Rd*, date de 1888.

Dans les machines du système Vauclain, les cylindres sont placés deux par deux de chaque côté, le petit cylindre étant placé au-dessus du grand; les tiges des pistons des deux cylindres ainsi superposés actionnent une crosse commune, articulée à la bielle motrice; ces machines sont munies d'une soupape de démarrage non automatique, manœuvrée à volonté par le mécanicien.

Les *Brooks Locomotive Works*, de Dunkirk, ont construit un certain nombre de machines à quatre cylindres placés en tandem, qui sont, avec les locomotives du type Vauclain, les seules machines à quatre cylindres usitées en Amérique.

Pour terminer ce rapide historique du mode compound, citons la transformation des machines à huit roues accouplées, du *Central Mexican RR*, en machines compound à cylindres concentriques deux à deux, exécutée en 1890 par M. Johnstone, ingénieur en chef de cette compagnie.

Actuellement, le système compound est appliqué, dans le monde entier, à plusieurs milliers de locomotives, la Compagnie du *P.-L.-M.* en possède plus de 200 à elle seule. En France, on ne trouve guère que le type à quatre cylindres, tandis qu'en Allemagne on préfère la machine à deux cylindres. Aux États-Unis, les deux systèmes sont à peu près également usités mais le type à quatre cylindres est toujours du système Woolf.

109. Application du mode compound aux locomotives. — En présence des avantages si nettement reconnus, théoriquement et pratiquement démontrés, des détentes successives qui en ont fait adopter depuis plus de trente ans le principe dans la marine où il s'est absolument généralisé, on pourrait, à première vue, s'étonner qu'il soit encore appliqué aux locomotives dans une proportion si restreinte.

Cela tient à ce que, pour ces machines, le système compound présente des avantages thermiques moins marqués que dans les appareils à condensation et offre dans son application des difficultés résultant du service spécial auquel sont appelées les locomotives et des exigences particulières auxquelles elles sont soumises; quelques-unes de ces difficultés sont inhérentes à cette application particulière et irrémédiables, d'autres peuvent être surmontées au prix de quelques efforts et d'une certaine ingéniosité. C'est là un sujet très important sur lequel il nous semble opportun d'insister ici.

D'abord, la locomotive est, une machine à grande vitesse et sans condensation, deux caractères qui tendent, on le sait, à réduire par eux-mêmes, sans toutefois les annuler, les pertes à l'intérieur du cylindre et diminuent par conséquent l'importance du rôle des procédés adoptés eux aussi dans ce but. L'action de la vitesse du piston, plus grande dans les locomotives que dans tout autre type de machine à l'exception de quelques appareils récents de croiseurs et de torpilleurs, est, nous l'avons vu, des plus sensibles. Quant à la condensation, son influence n'est pas moindre. L'écart total de température, dans une machine monocylindre fonctionnant à une pression initiale de 11 kg., est de 119° environ, lorsque l'échappement s'effectue dans un condenseur, et de 70° seulement pour la marche sans condensation, soit une diminution de 41 0/0 de l'écart de température, diminution proportionnelle-

ment beaucoup plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que la perte de puissance résultant de la suppression du condenseur.

Un des principaux avantages pratiques des machines compound, lequel réside dans la régularité plus grande des moments moteurs (résultat de la faible détente opérée dans chaque cylindre), a moins de valeur pour la locomotive qui possède, dans sa propre inertie et celle de train, le plus puissant des volants. Elle en présente cependant une certaine au moment du démarrage ou à la montée des fortes rampes, en rendant le patinage moins fréquent.

On a souvent accusé la locomotive compound de présenter une moindre élasticité que la machine à simple expansion; autrement dit, ses cylindres étant proportionnés pour donner le maximum d'économie avec un degré donné d'introduction, de subir, dans son rendement, des perturbations importantes suivant les variations du travail. On a dit que le mode compound, qui donne de bons résultats dans les machines marines dont le travail est constant, ne convenait pas pour la locomotive soumise à des variations de travail extrêmement nombreuses et importantes. La déduction que l'on en a tirée ne nous semble pas très rationnelle. Certes il est incontestable que le rendement maximum correspond à un régime (pression, introduction, détente) déterminé, mais la plus mauvaise condition de marche de la machine compound, c'est-à-dire celle qui résulte d'une admission trop faible au petit cylindre entraînant une réduction telle de pression au réservoir que le grand cylindre ne produit plus qu'une faible portion du travail total, n'a en somme d'autre inconvénient que de la rapprocher, au point de vue thermique, de la machine ordinaire. La consommation de vapeur de la machine compound sera inférieure à celle de cette dernière pour les grandes introductions et s'en rapprochera seulement pour les très faibles admissions au petit cylindre; elle ne lui sera pas supérieure dans les plus mauvaises conditions de marche.

D'ailleurs, le rendement de la machine monocylindre ne subit-il pas lui-même d'importantes variations quand le travail à développer et le degré de détente changent dans une forte proportion? Il existe aussi, pour cette machine comme pour la compound, un degré de détente qui, à une pression déterminée, correspond à la consommation minimum de vapeur. A une détente *plus grande* aussi bien qu'à une détente plus faible, correspond une *diminution de l'utilisation* de la vapeur. C'est là un point très important que l'on semble avoir parfois perdu de vue.

Tout ce que l'on pourrait objecter c'est, pour la compound, une diminution du rendement mécanique avec de très faibles introductions, tout le mécanisme du ou des grands cylindres devant être mis en mouvement sans produire un travail proportionné et créant un frottement nuisible. Cette perte réelle qui, si la machine est bien proportionnée, n'atteint toute son importance qu'à une

allure exceptionnelle, est largement compensée par un accroissement de l'utilisation au cran normal de marche. En revanche, aux grandes introductions, nécessaires au moment du démarrage, ou à la montée des rampes, ou pour le remorquage de trains extrêmement lourds, la machine compound possède un grand avantage et devient beaucoup plus économique que la locomotive à cylindres égaux parce que la détente ne peut y descendre au-dessous d'une limite convenable, par exemple quatre volumes pour un rapport de volumes des cylindres de 2,5 et une introduction de 0,60.

On ne doit pas invoquer, comme une condamnation du système compound, les artifices, d'ailleurs inapplicables à la locomotive, auxquels on a eu recours pour remédier à l'inconvénient que nous venons de signaler dans certaines applications à la marine militaire pour lesquelles les variations de travail, par exemple entre la marche à outrance et la marche à petite vitesse, peuvent se prolonger pendant un temps parfois très long. On n'a plus en réalité à considérer des variations brusques de travail, mais des allures différentes exigeant, sous peine d'une mauvaise utilisation prolongée parfois pendant un temps très long, que des précautions soient prises pour y remédier.

D'ailleurs, les expériences récentes de la Compagnie *P.-L.-M.* ont montré que, tout au moins dans les machines expérimentées, les consommations par cheval-indiqué et effectif ne suivaient pas la même loi et que, pour la marche à grande vitesse (90 km.) la dépense par cheval-utile diminuait quand on augmentait l'introduction au grand cylindre alors que la consommation par cheval-indiqué augmentait. Dans ces locomotives, aux grandes vitesses, les grands cylindres ne produisent plus qu'une très faible partie $\left(\frac{1}{5,56}\right)$ du travail total.

La machine compound peut présenter un inconvénient dont on a peu parlé jusqu'ici. Quand, le diamètre du petit cylindre étant le même que dans une machine donnée à simple expansion, le rapport du cylindre est supérieur à deux volumes, la contre-pression totale sur le piston à basse pression est, toutes choses égales d'ailleurs, plus grande (sa surface l'étant elle-même) que la somme des contre-pressions sur les deux pistons de la machine à cylindres égaux. Il est juste de remarquer toutefois que, la pression devant le piston pouvant être diminuée par suite de la détente plus grande précédant l'avance à l'échappement, cet inconvénient peut se trouver annulé.

La question du démarrage, est aussi la source de certaines difficultés dans l'application du principe compound aux locomotives. Ces machines, lorsqu'elles sont à simple expansion, comprennent toujours deux cylindres actionnant des manivelles à angle droit et dont les distributions sont réglées pour des admissions maxima de 75 à 80 0/0. Quelle que soit la position des manivelles au moment de l'arrêt, un des cylindres au moins reste toujours en admission, la marche étant à fond de course et le tiroir correspondant

découvrant plus ou moins complètement une des lumières. Le démarrage pourra s'effectuer dès que le régulateur sera ouvert ; quand les orifices du cylindre qui a servi au démarrage viendront à se fermer par suite de la rotation de l'essieu et du déplacement de la coulisse, l'autre cylindre à son tour sera en admission. Une fois la machine lancée, son inertie tient lieu de volant et, pourvu que le travail nécessaire soit accompli, le nombre des cylindres à l'intérieur duquel il s'opère n'a plus d'importance. Or, dans la machine compound à deux cylindres, si, au moment de l'arrêt, le petit cylindre n'est pas en admission, le démarrage ne pourra s'effectuer à moins que l'on introduise directement la vapeur de la chaudière dans la boîte à tiroir du grand cylindre. En outre, même au cas où le petit cylindre serait en admission au moment du démarrage, ce dernier s'accomplirait plus lentement parce que le moment agissant sur l'essieu moteur serait plus faible ; il ne correspond, au début, qu'à l'action d'un seul cylindre dont le volume n'est pas sensiblement supérieur à l'un de ceux d'une machine à cylindre unique et où la contre-pression est beaucoup plus grande. C'est ce qui a donné naissance aux valves spéciales de démarrage dont nous parlons plus loin. Pour se dispenser de cette addition, certains inventeurs ont muni les machines de deux cylindres à haute pression actionnant des manivelles calées à angle droit comme dans les locomotives à simple expansion. Toutefois, le faible volume de ces cylindres rend parfois le démarrage difficile, et on est encore conduit à prévoir un dispositif permettant d'introduire directement la vapeur dans la boîte à tiroir du ou des grands cylindres pendant la période de démarrage.

La locomotive compound à deux cylindres munie d'un appareil spécial de démarrage et d'une valve interceptrice pourra présenter un effort de traction supérieur à celui des machines ordinaires puisque ses cylindres sont plus grands. Toutefois, comme la limite de l'effort réel de traction est imposée par l'adhérence, ce surplus de puissance n'est d'aucune utilité une fois cette limite atteinte.

Il est incontestable d'autre part, que le système compound, appliqué aux locomotives, entraîne une certaine complication, parfois peu considérable il est vrai. En outre, dans les machines à deux cylindres, le cylindre admetteur a forcément un grand diamètre qui rend parfois son installation difficile, si la machine est de grande puissance. Lorsque les cylindres, au nombre de trois ou de quatre, se trouvent disposés sur la même ligne, ils donnent naissance à une surcharge à l'avant de la machine pouvant exiger l'emploi d'un bogie ou d'un bissel.

Ces restrictions une fois posées, on doit constater que, malgré tout, le mode compound, s'il ne donne pas, dans son application à la locomotive, des résultats économiques aussi marqués qu'on serait porté à le croire

d'après ceux que l'on a relevés sur des machines d'une autre espèce, constitue encore le procédé le plus efficace pour diminuer la dépense de vapeur et que son emploi est à conseiller quand la question de consommation devient prédominante.

Les considérations exposées plus haut font ressortir les graves difficultés avec lesquelles se sont trouvés aux prises les constructeurs et les inventeurs qui ont attaqué le problème et l'ont souvent résolu avec ingéniosité et talent.

D'ailleurs, nous allons voir que le système compound présente au contraire, dans son application à la locomotive, quelques avantages particuliers.

L'économie que l'on retire de l'application de la double expansion par suite de la meilleure utilisation de la vapeur en entraîne une autre qui se traduit par une réduction de la consommation de combustible et des dépenses d'entretien résultant de ce que, pour produire une puissance donnée, la chaudière pourra être moins forcée. Son rendement se trouvera donc un peu meilleur et son usure sera moins rapide.

Le système compound présente un autre avantage, qui n'a peut-être pas d'importance en France où les mécaniciens, intéressés aux économies de combustible, ont tout intérêt à marcher dans les conditions les plus favorables, mais qui, dans d'autres contrées, aux États-Unis notamment, où le personnel est négligent sous ce rapport, devient le plus important de tous : c'est qu'il impose un *degré minimum de détente*, puisqu'il se produit encore une expansion très notable, quand les coulisses sont placées au cran extrême. En somme, il diminue d'une façon bien nette l'influence du « coefficient mécanicien », c'est-à-dire qu'il permet d'obtenir de bons résultats économiques avec un personnel de valeur ordinaire et rapproche les résultats relevés sur les machines conduites par les bons agents et les médiocres.

L'économie brute de combustible envisagée en elle-même n'est pas, d'ailleurs, le principal desideratum que l'on doive viser dans la locomotive qui doit être avant tout capable d'effectuer le service demandé, ce qui, dans le cas des machines express, exige d'abord la puissance et la légèreté. C'est donc surtout l'économie de *vapeur* qu'il faut avoir en vue, afin de retirer le plus grand travail possible d'une chaudière de poids donné. Or, un procédé qui, dans des circonstances très favorables, peut déterminer une réduction de la dépense de vapeur pouvant s'élever jusqu'à 20 0/0, n'est pas négligeable à ce point de vue. On pourra trouver là une ressource utile, pour augmenter la puissance des machines sans accroître leur poids.

L'application du mode compound peut être aussi le résultat indirect de considérations qui lui sont étrangères à première vue ou de l'adoption de conditions particulières de fonctionnement. Un exemple frappant nous est donné par les locomotives compound à quatre cylindres usitées par

plusieurs Compagnies françaises. Il peut être intéressant, pour des locomotives dont la puissance est supérieure à la moyenne, de répartir sur deux des essieux les efforts moteurs dont la division diminue la fatigue des organes ou permet de leur donner une plus grande légèreté, ce qui réduit l'action des forces perturbatrices. Or, l'emploi de quatre cylindres étant nécessaire pour réaliser ce desideratum, il serait peu rationnel, une fois leur adoption décidée, de ne pas en profiter pour recourir au mode compound. De même, M. A. Mallet a trouvé, comme nous le verrons plus loin, dans l'application de la double expansion une solution élégante du problème si difficile qui consiste à concilier l'adhérence totale avec la flexibilité. Nous avons vu plus haut que certaines Compagnies avaient eu recours au mode compound comme conséquence de l'élévation du timbre, réalisée parfois dans un but qui n'avait rien à voir avec l'amélioration du régime économique. M. F. W. Webb, au *London and North Western Ry*, a surtout introduit son système compound à trois cylindres pour supprimer les bielles d'accouplement.

Si l'on accroît la pression de régime à la chaudière, au delà, par exemple, de 13 à 14 kilogrammes, l'expansion successive peut s'imposer, non seulement parce qu'elle constitue le meilleur moyen de produire efficacement de grandes détentes en réduisant les pertes qui tendent à en diminuer l'utilisation, mais aussi parce qu'elle fournit le moyen mécanique de réaliser cette détente, avec les appareils usuels de distribution, la coulisse et le tiroir à coquille, ce qui peut bien avoir son intérêt pour les locomotives. La détente théorique théorique étant égale au quotient du rapport des volumes des cylindres (R) par l'introduction au petit cylindre, il suffira, dans une machine compound, où on aura $R = 2,4$, d'une introduction de 0,40 au petit cylindre pour produire une expansion totale de 6 volumes. Or, pour obtenir dans de bonnes conditions, sans laminage, avances ou compression excessifs, une détente analogue, on devrait avoir recours à des appareils de distribution du du genre Corliss.

110. Types de locomotives auxquels il convient surtout d'appliquer le mode compound. — Bien qu'à ce sujet l'opinion soit encore assez partagée, il semble, et c'est ce que l'on a bien compris en France jusqu'ici, que l'application du mode compound soit plus logique pour les locomotives express que pour les machines à marchandises. D'abord, les avantages à recueillir sont plus grands, la machine à grande vitesse ayant plus à gagner, non pas à l'économie de combustible, mais à l'économie de vapeur, qui permet d'accroître la puissance qu'elle est susceptible de développer par unité de poids, question primordiale pour le service des trains rapides et qui présente moins d'importance pour les trains lents. La division de la puissance sur deux essieux, conséquence de certaines applications du mode compound,

offre aussi son maximum d'avantages pour les machines express qui, développant plus de puissance et marchant plus vite, sont plus exposées à la fatigue et produisent sur les voies une attaque plus violente.

D'autre part, les inconvénients du système compound, que nous avons signalés plus haut, sont minima pour ce genre de machines. La vitesse de marche et la charge remorquée sont plus régulières, les arrêts considérablement moins fréquents ; par conséquent, le rendement subit des variations moins grandes et la question du démarrage qui, dans certains types à double expansion, est assez délicate, perd de son importance.

Aux Etats-Unis, on a plutôt appliqué le système compound aux machines à marchandises, mais, dans la plupart des cas, à des locomotives appelées à remorquer des trains lourds et accélérés exigeant aussi une puissance considérable unie à une légèreté aussi grande que possible. Le problème se pose donc de la même manière que pour les machines à grande vitesse, mais cependant avec une importance atténuée. On ne doit pas oublier d'ailleurs que les locomotives à grande vitesse usitées en Amérique ont généralement des roues de plus petit diamètre que les nôtres et que la vitesse de piston, qui a tant d'effet sur la réduction des condensations intérieures, principal avantage du mode compound, y est plus grande.

Quelques ingénieurs américains[1], non sans une certaine apparence de raison, classent les locomotives dans l'ordre suivant en ce qui concerne leur adaptation au système compound :

1° Services métropolitains ;
2° — de banlieue ;
3° — des marchandises ;
4° — des trains express.

C'est absolument l'ordre inverse à celui qui, au premier abord, paraît rationnel, mais on peut très bien le défendre. Dans les services à arrêts fréquents, les démarrages sont nombreux. Or, au moment du démarrage, la machine à cylindres égaux travaille à pleine course avec des admissions très prolongées, tandis que, même dans ces conditions, la machine compound fonctionne avec détente. De là un avantage, pour ce dernier type de machine, d'autant plus marqué que les démarrages seront plus nombreux et plus fréquents. Toutefois, cela n'est vrai que si l'on emploie un système compound se prêtant facilement au démarrage et dans lequel l'admission de la vapeur vive au grand cylindre cesse avant que les roues n'aient accompli plus d'un ou deux tours.

111. Comparaison des différents modes d'application du système compound

[1] Voir le *Bulletin de la Commission Internationale du Congrès des Chemins de fer*, numéro d'août 1896, p. 1023 et 1024.

aux locomotives. — En matière de construction mécanique, tout n'est que relativité, et l'on doit se défendre des idées absolues. Le service des machines est soumis à des conditions tellement multiples et variées, leur fonctionnement peut être envisagé à des points de vue si différents mettant au premier plan tel besoin ou telle considération, qu'il est impossible de prononcer, même eût-on l'autorité nécessaire que nous ne possédons pas, des jugements et des appréciations nettement formulés. C'est surtout en ce qui a trait aux locomotives compound que la plus grande réserve s'impose ; les Compagnies connaissent mieux que quiconque leurs besoins et ont en cette question pesé le pour et le contre avant d'adopter tel ou tel système, ou d'en rester au *statu quo*.

Aussi, nous contenterons-nous d'exposer simplement quels sont les avantages ou les inconvénients que peuvent présenter, pour la locomotive, les différents modes d'application du système compound, dont les uns ou les autres, suivant le point de vue auquel on s'attache, peuvent devenir prédominants.

Système compound à deux cylindres. — C'est la forme la plus simple du système compound, et celle qui se prête le mieux à la transformation d'une machine existante. Les organes du mécanisme sont identiques à ceux des locomotives à simple expansion du même type ; les cylindres seuls sont de diamètres différents.

D'autre part, pour des machines d'une certaine puissance, on est conduit à donner au grand cylindre un diamètre qui peut atteindre 0,80 m. et le rend très difficile à loger entre les longerons si on tient à placer les deux cylindres à l'intérieur, on ne lui permet pas toujours de s'inscrire dans le gabarit, surtout si les roues sont de faible diamètre, quand on les dispose à l'extérieur, Nous verrons ailleurs quels sont les artifices auxquels il faut alors avoir recours.

En outre, comme nous l'avons dit plus haut, le démarrage ne peut s'opérer sans que l'on ait recours à l'emploi d'une valve spéciale permettant d'admettre la vapeur vive à pression réduite, dans la boîte du grand tiroir et s'opposant à ce que cette vapeur n'exerce sur le petit piston une contre-pression qui viendrait réduire son action. Cette valve est tantôt automatique (Worsdell), tantôt à la main du mécanicien (Mallet et Von Bories).

Le système compound à deux cylindres ne présente que des avantages thermiques pouvant réduire la consommation de vapeur, il n'a pas pour effet de diminuer sensiblement les efforts sur l'essieu moteur ; nous disons sensiblement, car il y a encore un léger gain de ce côté, dû à ce que, la détente à l'intérieur de chaque cylindre étant moins prolongée en marche que dans les cylindres des machines à expansion successive, pour une

même ordonnée moyenne effective sur les pistons, les pressions initiales seront un peu plus faibles.

Système compound à trois cylindres. — On doit distinguer deux cas suivant qu'il y a deux cylindres d'introduction directe ou deux cylindres de détente ; les trois cylindres attaquent le même essieu ou un essieu différent. Dans ce dernier cas, si l'on dispose deux cylindres à haute pression dont les manivelles sont à 90°, le système possède quelques-uns des avantages que nous énumérons plus bas en ce qui concerne les locomotives à quatre cylindres, le démarrage peut s'effectuer avec une facilité à peu près aussi grande, à condition que les essieux moteurs soient reliés par des bielles d'accouplement.

Si, comme dans les machines Webb, le cylindre de détente est placé dans l'axe longitudinal de la machine, les organes du mouvement qu'il commande n'ont plus qu'une influence perturbatrice très atténuée; ils n'ont aucune action sur le lacet, diminué d'autre part par ce fait que si les petits cylindres sont extérieurs, en revanche, leurs organes, et surtout leurs pistons, sont très légers.

Si deux des cylindres sont à basse pression, la machine se comporte comme dans le cas de la locomotive à deux cylindres inégaux, et il devient nécessaire d'adopter des dispositifs spéciaux pour permettre le démarrage, Le principal avantage du système réside dans ce fait que la division du cylindre de détente permet de réduire les diamètres.

Si les trois cylindres sont placés sur une même ligne transversale, ils sont nécessairement situés à l'avant et occasionnent à ce point une surcharge sensible.

Les machines compound à trois cylindres du système Webb, les plus répandues passent pour présenter les avantages suivants :

Bien qu'il n'y ait que trois mécanismes, les efforts moteurs sont répartis sur deux essieux, d'où moindre fatigue des organes.

La stabilité est satisfaisante parce que les organes du mouvement des petits cylindres qui, seuls, sont extérieurs, ont un faible poids puisqu'ils ne transmettent normalement que la moitié environ des efforts exercés par chacun des pistons d'une machine à simple expansion de la même puissance. (Ce même avantage comme le précédent appartient aussi aux machines à quatre cylindres des types *Nord* et *P.-L.-M.*) Le grand cylindre étant placé dans l'axe, les pièces du mouvement qu'il commande ne donnent naissance à aucune perturbation propre à favoriser le lacet et les efforts verticaux sur les glissières n'entraînent aucun mouvement de roulis.

L'absence des bielles d'accouplement permet d'écarter, autant que le besoin peut s'en faire sentir, les deux essieux moteurs pour allonger le foyer par

exemple[1]. Elle améliore légèrement le rendement mécanique et la douceur de la marche.

D'autre part, ce système a été l'objet d'assez vives critiques. On lui reproche surtout sa lenteur au démarrage, la vapeur ne venant remplir le réservoir qu'après que les roues arrière, qui sont actionnées par les petits cylindres, ont déjà tourné. Il faut donc, ou que le train soit léger et puisse être démarré par la paire de roues arrière seule, ou que les roues patinent jusqu'à ce que la pression au réservoir soit suffisante pour diminuer notablement la pression effective sur les pistons à haute pression et mettre en jeu le piston à basse pression. Si celui-ci n'est pas en admission au moment du démarrage, il faudra nécessairement que ce dernier, au premier moment, s'opère avec les roues d'arrière seules. La pression au réservoir montant alors rapidement, les roues du milieu patineront à leur tour dès qu'il y aura admission au grand cylindre. La pression au réservoir venant dès lors à diminuer brusquement, les roues d'arrière patineront de nouveau et ce double patinage intermittent se produira jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, ce qui prend un certain temps. Les variations brusques de l'effort de traction, résultant de ce fonctionnement, communiquent parfois au train entier de légères secousses que sentent très bien des voyageurs.

La suppression des bielles d'accouplement, en établissant l'indépendance des deux mécanismes à haute et basse pression, permet une variation continuelle de l'angle que fait la manivelle du cylindre à basse pression avec celles des cylindres admetteurs et favorise la création de perturbations, qu'il est impossible de corriger en raison de leur irrégularité.

Les mouvements de rotation sur l'essieu milieu sont soumis à de grandes variations par suite de l'emploi d'un cylindre et d'une manivelle uniques.

Enfin le cylindre de détente a un volume d'autant plus considérable que le rapport des volumes choisis par M. H. Webb est élevé, ce qui offre les inconvénients signalés ailleurs.

Dans tous les cas, la complication du système, qui s'applique difficilement aux machines existantes, est plus grande que dans le cas du type à deux cylindres.

Ce type ne paraît pas appelé à se répandre.

Machines à quatre cylindres en tandem. — Ce système possède les avantages du type à deux cylindres sous le rapport de son application facile aux machines existantes sans que l'on ait à modifier les organes du mécanisme, à part les pistons et leurs tiges ; comme il comporte deux cylindres à haute

[1] On doit cependant remarquer que la Compagnie du *L. and N.-W.* n'a pas profité de cet avantage et que les essieux moteurs d'aucun de ses types express ne sont pas aussi écartés que ceux des locomotives des Compagnies de l'*Ouest*, du *Nord* et de l'*Est* munies pourtant de bielles d'accouplement.

pression, le démarrage est toujours assuré, mais moins bien que dans les locomotives à simple expansion, à cause du petit diamètre de ces cylindres, si l'on ne dispose aussi une introduction directe de vapeur aux grands cylindres; mais on peut, dans ce cas, se dispenser de l'emploi d'une valve interceptrice.

En revanche, cette disposition, qui au point de vue thermique est inférieure au type à réservoir intermédiaire, entraîne une augmentation de poids très notable des cylindres, placés tous quatre dans la même région de la machine ordinairement à l'avant, ce qui nécessite l'emploi d'un bissel ou d'un bogie[1]. La grande longueur que présentent les deux cylindres en tandem placés de chaque côté n'est pas sans causer quelques difficultés dans leur installation. Cette longueur se trouvant notablement augmentée par la nécessité de ménager la place pour le démontage des deux presse-étoupes des fonds qui se regardent, certains constructeurs ont étudié des dispositifs comportant une garniture commune permettant de rapprocher les deux cylindres.

Le système tandem entraîne une difficulté spéciale en ce qui a trait au démontage ou à la visite des pistons. On doit prévoir des dispositons permettant de retirer ceux-ci, l'un par l'avant, l'autre par l'arrière. Sans cette précaution on serait amené à démonter le petit cylindre pour pouvoir retirer le grand piston.

Machines à quatre cylindres disposées deux à deux, côte à côte. — Ce système, employé par M. Vauclain, possède la plupart des avantages et des inconvénients du type tandem sur lequel il présente cette supériorité de présenter une moindre longueur et de permettre d'opérer la distribution à l'aide d'un tiroir unique peu encombrant, cylindrique et équilibré, dans la disposition duquel réside surtout l'invention du constructeur. Il offre d'autre part cette infériorité que les efforts ne sont pas, pour tous les crans de marche, bien répartis sur les deux tiges de piston de chaque groupe ; aussi a-t-il fallu prévoir un système de guidage s'opposant aux efforts obliques exercés sur la crosse qui doivent causer un frottement souvent anormal.

Machines à quatre cylindres actionnant deux essieux moteurs. — Deux cylindres intérieurs égaux, à haute ou à basse pression, actionnent un des essieux, deux autres cylindres extérieurs, à basse ou à haute pression, égaux entre eux, commandent un autre essieu moteur. Ces deux essieux peuvent être indépendants ou reliés par des bielles d'accouplement; cette dernière disposition a été adoptée dans toutes les machines françaises de ce type (à l'exception de la locomotive d'essai n° 701 de la Compagnie du *Nord*).

[1] On a pu s'en dispenser dans les machines Woolf à quatre cylindres de la Compagnie du *Nord* en raison des dispositions particulières adoptées en vue de réduire le porte à faux et de la faible vitesse qu'atteignent ces machines.

Ce système offre une complication plus grande que les précédents puisqu'il comporte quatre cylindres et quatre mécanismes complets; le nombre des organes du mouvement est double de celui des locomotives ordinaires ; toutefois on remarquera que cette complication réside dans le nombre des pièces et non dans leur disposition propre : on n'introduit dans la locomotive aucun nouvel organe délicat ou peu familier aux mécaniciens. Il ne s'applique pas aux machines existantes et entraîne une augmentation légère du poids et du prix de la machine ; on pourrait aussi, à première vue, croire à un accroissement des dépenses de graissage et d'entretien.

Voyons comment ces inconvénients se trouvent compensés. Les cylindres et les organes du mécanisme ont des dimensions plus faibles que dans les machines à deux cylindres, la symétrie reste aussi complète que dans la locomotive à simple expansion, puisqu'il se trouve, de chaque côté du plan longitudinal médian de la machine, un groupe semblable formé de deux cylindres dont l'un à haute et l'autre à basse pression. La fatigue des essieux moteurs et de la voie est diminuée : celle des essieux parce que chacun d'eux ne transmet que la moitié du travail de la locomotive ; celle de la voie parce que les contrepoids alternatifs sont très réduits et que les surcharges momentanées dues à l'obliquité des bielles, proportionnelles aux efforts transmis par ces dernières, sont moindres, le travail étant transmis par quatre bielles.

Ainsi, pour ne parler que des surcharges de chaque roue sur le rail, l'emploi de quatre cylindres a permis de les réduire de 4 317 kg. à 1 371 kg. pour les machines express de *P.-L.-M.* à la vitesse de 70 km. En outre, les deux cylindres extérieurs pouvant être placés au milieu de la machine, dans le sens de la longueur, on diminue le moment qui tend à soulever l'avant de la machine et qui est dû à l'obliquité des bielles.

Ce moment est passé, pour les machines de la même Compagnie, à la vitesse relatée ci-dessus, de 7 990 kg. pour les express non compound, avec des cylindres en porte-à-faux à l'avant, à 2 215 kg. pour les locomotives compound à quatre cylindres. La charge de l'essieu avant ou du bogie reste ainsi plus constante et la voie, toujours bien chargée, se trouve dans de meilleures conditions pour résister aux efforts transversaux, eux-mêmes moins considérables, ce qui contribue à diminuer les chances de déformation accidentelle de la voie.

Les manivelles correspondantes du même côté peuvent être calées à 180°, d'où résulte un équilibre satisfaisant des organes du mécanisme permettant de supprimer les contrepoids alternatifs. Cette condition, il est vrai, serait aussi bien réalisée si les quatre cylindres actionnaient le même essieu moteur.

Malgré l'accroissement du nombre des organes ou plutôt en raison même

de cet accroissement, les locomotives à quatre cylindres courent moins de chances de détresse en cours de route que les locomotives à deux cylindres, en cas de rupture d'une des pièces du mécanisme.

Le démarrage s'effectue rapidement parce que la machine comporte deux cylindres à haute pression actionnant des manivelles calées à angle droit. On peut d'ailleurs le rendre plus facile que pour les locomotives ordinaires en disposant un échappement direct éventuel des petits cylindres et une admission de vapeur vive aux grands cylindres.

Si le système à quatre cylindres commandant deux essieux distincts donne un excédent de poids, du moins cet excédent est appliqué en deux points de la longueur et, ne modifiant pas l'assiette de la machine, se répartit convenablement sur les essieux en entraînant pour eux le minimum de surcharge. Dans les locomotives à foyer profond plongeant entre les deux essieux arrière, il a l'avantage de reculer le centre de gravité et permet de réduire ou même de supprimer le lest, souvent nécessaire quand il n'y a que deux cylindres placés à l'avant. Dans ce cas, il n'y a pas d'augmentation du poids total.

L'expérience semble prouver que ce système n'entraîne pas d'augmentation des dépenses d'entretien ou de graissage, la diminution de la fatigue et par conséquent de l'usure des pièces frottantes et des articulations compensant l'accroissement de leur nombre.

Bref, ce système fournit un procédé rationnel permettant d'accroître la puissance des locomotives, sans augmenter la vaporisation, sans accroître la fatigue des organes et de la voie. Aussi n'est-il pas étonnant que ce type de machine, introduit par M. de Glehn, Administrateur-délégué de la *Société alsacienne*, et dont le succès est en grande partie dû à l'initiative éclairée de MM. les ingénieurs en chef du Bousquet et Ch. Baudry, qui l'ont respectivement appliqué avec quelques variantes sur les réseaux du *Nord* et de *P.-L.-M.*, se soit généralisé chez nous au point que presque toutes les Compagnies françaises, ou l'ont adopté comme type courant pour le service des trains de grande vitesse, ou l'expérimentent actuellement. Les machines de ce modèle sont dès maintenant employées pour la traction de la plupart des trains rapides par les Compagnies du *Nord*, de *Lyon* et du *Midi*. La Compagnie de l'*Ouest* en a fait d'abord construire deux spécimens présentant par ailleurs les dispositions générales et les dimensions des locomotives à bogie non compound du dernier modèle, ce qui a permis d'effectuer des comparaisons intéressantes en service, et a, depuis, commandé un lot important de machines de ce type, plus puissantes.

D'autre part, l'insuccès de la locomotive compound en Angleterre paraît dû en grande partie à l'emploi du système à deux cylindres et, ce qui semble ajouter quelque force à cet argument, c'est que les seules locomotives à double

expansion qui aient donné de bons résultats de l'autre côté de la Manche et aient continué à être usitées en service courant et journalier, sont des machines Webb à trois cylindres actionnant deux essieux différents et dont le fonctionnement, en principe, se rapproche de celui des compounds à quatre cylindres.

Un mouvement semble cependant se dessiner aussi en Angleterre en faveur du type compound à quatre cylindres, en présence de son succès incontestable en France. Nous apprenons que la Compagnie du *L. and N.-W. Ry* fait construire dans ses ateliers une locomotive à bogie de ce système. Le *G. and S.-W.* a mis en service en 1897 une machine express à quatre cylindres, mais non compound.

Machines à quatre cylindres actionnant, deux à deux, deux groupes indépendants d'essieux. — Les machines articulées de M. A. Mallet offrent un autre exemple non moins frappant des avantages que le système compound à quatre cylindres peut présenter, indépendamment de la question d'économie de vapeur, et constituent la solution la plus satisfaisante et la plus rationnelle que l'on ait trouvée jusqu'à ce jour du problème de l'adhérence totale pour les locomotives destinées aux lignes à fortes rampes et à courbes de petit rayon. On sait que, dans ce système, les petits cylindres, actionnant le groupe arrière des roues accouplées et recevant de la vapeur à haute pression, sont fixés au châssis principal comme dans les locomotives des types ordinaires; seuls, les grands cylindres sont solidaires d'un truck articulé, constitué par un second groupe d'essieux. Une telle machine présente une souplesse aussi grande qu'il peut être nécessaire, sans offrir les mêmes inconvénients que les locomotives Fairlie, qui ont deux tuyaux articulés nécessaires pour alimenter les deux groupes de cylindres et qui sont appelés à recevoir de la vapeur à haute pression, tandis que les machines du système Mallet ne présentent qu'une seule conduite articulée laquelle, dirigeant l'échappement des petits cylindres vers les grands, n'est traversée que par de la vapeur à une pression relativement basse, ce qui diminue les chances de fuite et les difficultés de l'entretien.

En résumé, on peut considérer que le système compound à deux cylindres ne possède que des avantages thermiques joints à la plus grande simplicité compatible avec l'application de la double expansion.

Les systèmes à trois ou quatre cylindres, plus compliqués, présentent les mêmes avantages thermiques, unis à de sérieux avantages pratiques concernant la réduction des efforts et de la fatigue des organes du mécanisme.

112. Calcul de l'effort de traction des locomotives compound. — On emploie une expression de la même forme que pour les locomotives à simple

expansion, le coefficient seul diffère. Le diamètre d entrant dans la formule est celui du *petit cylindre*. M. A. Mallet recommande le coefficient de 0,50 et l'expression devient :

$$F = 0{,}50\ P\ \frac{d^2 l}{D}$$

Cette formule correspond bien aux résultats obtenus en pratique; elle ne donne pas tout à fait le maximum, ce qui offre une certaine marge. Elle présente l'avantage d'une grande simplicité pour les machines à quatre cylindres (dont deux à haute pression) pour lesquelles elle devient :

$$F = P\ \frac{d^2 l}{D}$$

M. Von Borries emploie, pour les machines à deux cylindres, l'expression :

$$F = P\ \frac{d'^2 l}{2D}$$

dans laquelle d' représente le diamètre du *grand cylindre*. Il est facile de voir que cette expression revient à la précédente pour le rapport usuel de 2,18 entre les volumes.

113. Influence des variations de l'admission sur le travail développé dans chaque cylindre. Egalisation des travaux dans les deux cylindres. Réglage des introductions. — Si, dans la machine compound théorique, on diminue l'introduction au petit cylindre, l'admission au grand restant constante, la pression au réservoir et, par conséquent, la pression moyenne sur le grand piston, se trouvent diminués. Le travail effectué par ce dernier sera donc moindre.

Le diagramme des pressions dans le petit cylindre se verra diminué du côté de l'admission et accru du côté de l'échappement, le travail correspondant subira une réduction moins grande que celui du cylindre de détente. Le travail total diminuera, mais la proportion de ce travail qui sera accompli dans le petit cylindre se trouvera plus considérable. Si les admissions restent les mêmes dans les deux cylindres, le cylindre de détente développera au contraire plus de puissance que l'autre.

On voit donc, qu'en faisant varier convenablement les introductions dans les deux cylindres, on pourra arriver à égaliser plus ou moins complètement les travaux correspondants, par suite des variations de la pression au réservoir.

La machine réelle obéit aux mêmes lois et cela d'autant plus que le fonctionnement se rapproche davantage de celui de la machine théorique. Si, au contraire, il se produit une compression et un laminage excessifs ou une

perte de pression dans le réservoir intermédiaire, il deviendra à peu près impossible d'égaliser les travaux développés dans chaque cylindre. On voit de suite l'intérêt qu'il peut y avoir, pour obtenir ce résultat désirable, à étudier convenablement la distribution et à donner au réservoir intermédiaire un volume suffisant.

L'égalité des travaux développés dans les cylindres à haute et basse pression offre un beaucoup moins grand intérêt dans les machines tandem, composées de deux groupes symétriques de cylindres actionnant autant de manivelles, parce que, quelle que soit la répartition de la puissance dans chaque cylindre, le travail produit par chaque groupe, reste le même. Dans les machines du type Vauclain, on devra s'attacher à égaliser plutôt, à tout instant, les pressions exercées sur chaque piston que les puissances indiquées.

Le choix des introductions convenables n'a pas seulement pour objet de chercher à réaliser l'égalité des pressions. Il a aussi une action marquée sur le régime économique en répartissant aussi également que possible les écarts de température dans chaque cylindre.

Pour les machines à deux cylindres, M. Von Borries recommande, d'après sa propre expérience, de combiner les deux distributions en vue d'obtenir des introductions correspondantes indiquées ci-dessous :

Haute pression.	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,78
Basse pression.	0,40	0,50	0,58	0,60	0,73	0,70

M. Worsdell disposait les distributions de manière que l'introduction au grand cylindre soit de 20 0/0 supérieure à celle du petit.

M. Borodine règle une fois pour toutes l'admission au cylindre à basse pression et fait varier le travail en modifiant l'introduction du petit cylindre ou en agissant sur le régulateur. Cette manière d'opérer a reçu récemment une sanction très remarquable à la suite des expériences de la Compagnie *P.-L.-M.*

D'après M. Privat, l'examen de courbes de dépense de vapeur, dans les locomotives compound de cette Compagnie, montre que la dépense de vapeur va légèrement en croissant lorsque, laissant fixe l'introduction aux cylindres de détente, on augmente l'admission aux grands cylindres ; par contre, la dépense par cheval utile va constamment en diminuant ; la diminution, peu importante à la vitesse de 60 km. à l'heure, pour tous les crans d'introduction aux petits cylindres et à toutes les vitesses pour le cran 5, s'élève, à la vitesse de 90 km., à environ :

18 0/0 pour la marche au cran	4	aux petits cylindres	
23 —	—	3	—
54 —	—	2	—

lorsqu'on passe du cran 4 au cran 7 d'introduction aux petits cylindres.

Comme conséquence, les mécanismes de changement de marche de toutes les locomotives compound à grande vitesse que possède la Compagnie *P.-L.-M.* ont été modifiés de manière à laisser l'introduction à peu près constante aux grands cylindres et égale à 0,70 environ.

Il semble difficile de ne voir là qu'un résultat particulier au type de locomotive usité par la Compagnie de *Lyon* et on peut être conduit à leur attribuer une portée plus générale.

D'autre part, les mêmes essais ont clairement montré que l'augmentation de l'admission au petit cylindre entraîne une meilleure répartition du travail. Pour que cette répartition fût égale avec les rapports de cylindres usuellement adoptés, il faudrait que l'admission fut égale dans les deux cylindres, mais ce n'est pas la marche la plus économique.

114. Rapport des volumes des cylindres[1]. — On ne peut ordinairement donner au grand cylindre des locomotives compound, par suite des dimensions restreintes du gabarit et de la nécessité de limiter le poids des organes animés du mouvement alternatif, du piston par exemple, un diamètre aussi grand que celui qui correspondrait théoriquement au fonctionnement le plus économique. Comme, d'autre part, le diamètre minimum du petit cylindre est déterminé par la nécessité de développer la puissance et l'effort de traction nécessaires, il en résulte que le rapport des volumes n'est jamais élevé.

Ce rapport varie dans la pratique de 1,80 pour les plus fortes machines, à 2,75 pour les plus petites. Dans les locomotives à trois cylindres on peut aller jusqu'à 3.

M. Mallet considère le rapport de 2 volumes comme un minimum au-dessous duquel on ne doit jamais descendre. Cet ingénieur, comme M. Von Borries, recommande le rapport de 2,25.

Voici quelques exemples :

COMPOUND A 2 CYLINDRES

	Rapport des volumes.
Mallet (Bayonne à Biarritz, 4 R. acc.)	2,78
— (— 6 R. acc.)	2,25
— (Jura-Simplon)	2,38
Von Borries (Etat prussien, 4 R. acc.)	2,18
Wordell (North Eastern, express et marchandises)	2,09
Schenectady (types divers)	2,25
Rode-Island (—)	2,18

[1] Il s'agit ici du rapport des volumes engendrés par les pistons à haute et basse pression et non du véritable rapport des volumes des cylindres, un peu différent du premier à cause de la proportion inégale des espaces morts.

COMPOUND A 3 CYLINDRES

Webb (type *Experiment.*)	2,56
— (type *Dreadnought.*)	2,30
— (machine à 8 R. acc.)	2,01
Gothard	2,37

COMPOUND A 4 CYLINDRES

Nord (express)	2,42
P.-L.-M. (express)	2,53
Midi (6 R. acc.)	2,47
Nord (8 R. acc.-tandem)	3,02
Etat hongrois (tandem)	1,99
Brooks (tandem)	2,86
N.-Y. L. E. (Woolf-Vauclain)	2,84
Mallet (machines-articulées)	2,08 à 2,13

Le rapport des volumes ne semble pas pouvoir dépasser 2,40 pour les locomotives compound à réservoir d'une certaine puissance ; avec un rapport inférieur, on obtient plus facilement l'égalité des travaux aux cylindres à haute et à basse pression pour les différentes allures. Lorsque ce rapport dépasse 2,40, il devient impossible de répartir uniformément le travail aux grandes vitesses.

Ainsi, les locomotives express compound à quatre cylindres de la Compagnie *P.-L.-M.*, au cours des essais mentionnés plus loin, ont donné les résultats suivants :

Crans de marche.		Rapport du travail développé dans le petit cylindre à celui du grand.
Cylindres HP.	Cylindres BP.	
2	7	5,56
3	7	3,13
4	7	2,30
5	7	1,69

L'inégalité des travaux développés dans les cylindres à haute et à basse pression diminue, on le voit, à mesure qu'on augmente l'introduction au petit cylindre et que le travail total augmente, ce qui est du reste conforme à la théorie de la machine compound.

L'*État hongrois*, avant de fixer définitivement les dimensions des cylindres de ses locomotives tandem, s'est livré à une série d'essais qui ont démontré que, tout au moins pour les machines du type Woolf, on n'avait pas intérêt à augmenter, au delà d'une certaine limite, les dimensions du grand ou du petit cylindre, ni le rapport des volumes. Il s'est arrêté finalement à un rap-

[1] On voit que le rapport des volumes diminue à mesure que les machines sont plus puissantes. Cela tient à ce que le volume du grand cylindre ne peut être indéfiniment augmenté.

port de 1,99. Les machines présentant ce rapport de volume ont dépensé une moyenne de 10,6 kg. de charbon par kilomètre, tandis que celles dont le rapport était 2,86 ont dépensé, dans les mêmes conditions, 11,3 kg. Avec un rapport inférieur à 1,99 la consommation augmentait également, mais dans une plus forte proportion ; ainsi, au rapport de 1,83, correspondait une consommation kilométrique de 12,5 kg.

En résumé, on peut admettre, pour les machines de grandes lignes, les rapports moyens suivants :

Machine compound à 2 cylindres	2 à 2,30
— — à 3 cylindres	2 à 2,40
— — à 4 cylindres et à 4 manivelles	2 à 2,60

115. Volume du réservoir intermédiaire. — Dans les machines compound à réservoir, le volume de ce dernier doit être aussi considérable que possible afin que la pression y soit peu variable, ce qui est favorable à l'économie, et que l'on puisse, dans la proportion désirable, égaliser les travaux développés dans les cylindres à haute et à basse pression.

Dans la machine à deux cylindres commandant des manivelles à angle droit, le volume du réservoir ne doit pas être inférieur au volume du petit cylindre, afin que les fluctuations de la pression n'y soient pas excessives au cours des phases de la distribution dans les deux cylindres et suivant qu'il reçoit la vapeur d'échappement du cylindre admetteur ou qu'il alimente au contraire le grand cylindre. Il en est de même des locomotives à quatre cylindres commandant un même nombre de manivelles, qui ne sont que l'extension du type précédent.

Le volume du réservoir atteint jusqu'à deux fois celui du petit cylindre dans un certain nombre de locomotives compound et ce volume n'est limité que par la condition de réduire au minimum le poids et l'encombrement du réservoir ou des conduites de vapeur qui en tiennent lieu aussi bien que les surfaces refroidissantes qu'il présente.

Dans les machines Woolf, il n'y a pas de réservoir à proprement parler, il ne doit même pas y en avoir puisque les deux pistons sont solidaires. On doit, au contraire, dans ces machines, chercher à réduire au minimum le volume des conduites d'admission et d'échappement dirigeant la vapeur d'un cylindre dans l'autre volume qui constituent dans ce cas un espace nuisible[1].

116. Disposition du réservoir intermédiaire. — Le réservoir intermédiaire est constitué par le conduit d'échappement du petit cylindre, le tuyau dirigeant cet échappement vers le grand cylindre et la boîte du tiroir à basse

[1] Ce volume n'est que les 17,5 p. 100 du volume du petit cylindre dans les machines Woolf à huit roues accouplées du *Nord*.

pression. Quelques constructeurs disposent le tuyau d'échappement du petit cylindre de manière qu'il contourne la boîte à fumée à l'intérieur et soit ainsi soumis à un certain réchauffage. Le bénéfice que l'on obtient ainsi est assez faible à cause de la grande vitesse que possède la vapeur à l'intérieur de ce tuyau et de la température peu élevée de la boîte à fumée; il serait même, suivant certains ingénieurs, plus que compensé par la perte de charge due aux coudes et au développement que l'on donne alors à ce tuyau, perte d'autant plus grande que la pression de la vapeur qui y circule est peu considérable (1 à 5 kg.). Aussi cherche-t-on plus souvent aujourd'hui à donner au conduit de communication des deux cylindres la forme la plus directe et la longueur la plus faible, dût-on renoncer au réchauffage.

117. Calage des manivelles. — Le calage des manivelles joue un rôle important en ce qui concerne soit la facilité du démarrage, soit l'uniformité des moments moteurs, soit la régularité de l'écoulement de la vapeur du petit vers le grand cylindre, les diverses considérations ont même conduit fréquemment, dans les machines à trois ou quatre manivelles, à adopter des calages notablement différents de ceux qui auraient été les plus propres à atténuer l'influence des efforts perturbateurs dus à l'inertie des organes animés du mouvement alternatif.

Dans les machines à deux manivelles, quel que soit le nombre des cylindres, le calage doit être de 90° comme dans les locomotives ordinaires, afin d'assurer le démarrage et l'uniformité la plus grande des moments moteurs.

Dans les machines à trois cylindres, les deux cylindres égaux, extérieurs, qui sont, suivant les types, à haute ou à basse pression (mais qui dans ce dernier cas servent, avec introduction directe de vapeur, pour le démarrage) commandent des manivelles calées à 90°. Dans les machines Webb, la manivelle du grand cylindre, grâce à l'absence des bielles d'accouplement, n'est pas reliée aux autres d'une manière rigide et fait avec elle des angles à tout instant variables suivant qu'une ou l'autre des paires de roues patine plus ou moins [1]. Dans les locomotives de ce type qui ont des bielles d'accouplement, il paraît rationnel de caler la manivelle du cylindre médian dans le prolongement de la bissectrice de l'angle droit que font entre elles les autres manivelles, soit à 135° de chacune d'elles.

Dans les machines à quatre cylindres de la Compagnie du *Nord*, les deux manivelles de chaque groupe sont calées à 90° l'une de l'autre et à 180° de celles de l'autre groupe. C'est la disposition qui paraît la plus propre à faciliter le démarrage et à équilibrer les organes alternatifs.

[1] En outre, le diamètre au roulement des deux paires de roues motrices n'est jamais exactement le même, les bandages ne s'usant pas également vite.

Beaucoup des machines compound à quatre cylindres construites par la *Société alsacienne* ont les manivelles des deux groupes à 90° l'une de l'autre mais les deux manivelles, à haute et basse pression, situées d'un même côté de la machine, au lieu de faire entre elles un angle de 180° sont calées à 162°, la manivelle à basse pression précédant l'autre. Cette disposition, tout en facilitant le démarrage, a l'avantage de donner au moment moteur une plus grande régularité.

Une étude approfondie de la question a conduit la Compagnie de *Lyon* à caler les manivelles des grands cylindres en avance de 135° sur celles des cylindres à haute pression, pour les machines express, ce qui, au démarrage, régularise les moments moteurs et présente l'avantage de produire, dans une certaine proportion, une atténuation des perturbations tendant à causer le lacet et le tangage, mais moins complète naturellement que si les manivelles se trouvaient calées à 180°.

118. Séquence des manivelles. — A l'origine des locomotives compound, on attachait une grande importance à la question de la séquence des manivelles et de longues discussions ont vu le jour ayant pour but de rechercher laquelle des deux manivelles, à haute ou à basse pression, devait précéder l'autre. Il semble que l'on ait avantage à caler celle du grand cylindre en avance sur l'autre, mais dans les machines possédant un réservoir suffisamment volumineux, cette question perd toute importance. Pour les machines qui ne possèdent pas de réservoir intermédiaire, comme celles du type Woolf, elle ne se pose même pas, les deux pistons à haute et basse pression étant solidaires de la même tige.

119. Dispositifs adoptés pour le démarrage. — Nous avons vu dans un paragraphe précédent qu'il était nécessaire, pour assurer le démarrage des locomotives compound, particulièment quand elles sont à deux cylindres, de prévoir des dispositifs spéciaux *automatiques* ou non *automatiques*.

Dans les locomotives à quatre cylindres, il peut suffire d'introduire de la vapeur vive dans le réservoir intermédiaire, mais dans les machines à deux cylindres on dispose en outre ordinairement soit un échappement direct du petit cylindre au dehors, soit une *soupape interceptrice* qui se ferme quand la vapeur est introduite directement dans la boîte du tiroir à basse pression, au moment du démarrage, afin d'empêcher que cette vapeur ne vienne exercer contre le piston à haute pression, une contre-pression nuisible diminuant ou annulant son action.

Dans les systèmes automatiques, cette valve interceptrice s'ouvre d'elle-même, fermant en même temps l'accès de la vapeur vive au grand cylindre, dès que la pression au réservoir s'exerçant sur une des faces de la

valve, due à l'échappement du petit cylindre, est devenue supérieure à celle qui règne dans la boîte à tiroir du cylindre de détente, laquelle agit sur l'autre face de la valve. Le fonctionnement revient ainsi de lui-même au mode compound sans que la volonté du mécanicien intervienne.

Dans les systèmes non automatiques, la valve d'interception, l'échappement direct du petit cylindre et l'introduction de vapeur vive sont commandés par une manœuvre spéciale à la main du mécanicien; le fonctionnement s'opère en simple expansion aussi longtemps que cet agent le trouve nécessaire.

Il existe enfin des systèmes mixtes, capables d'agir automatiquement, mais dont le fonctionnement automatique peut être suspendu par le mécanicien en agissant sur une manœuvre spéciale.

L'ingéniosité des inventeurs s'est surtout exercée à réaliser un appareil de démarrage présentant, sous la forme la plus simple et la moins volumineuse, une combinaison de valves solidaires les unes des autres, soit par des tringles, soit au moyen de la vapeur agissant sur des pistons différentiels permettant à la fois, d'une manière instantanée, l'échappement direct du petit cylindre dans l'atmosphère, l'introduction directe de vapeur au réservoir et l'interception du tuyau de communication du petit au grand cylindre.

Certains systèmes non automatiques sont munis d'une sorte de servomoteur commandant les valves d'échappement direct et d'interception, sur lequel le mécanicien agit à l'aide d'un simple robinet placé dans l'abri. Les pistons auxiliaires du servo-moteur ou simplement la valve qui contrôle son mouvement peuvent être actionnés par de la vapeur ou simplement par l'air comprimé, emprunté au réservoir du frein (*Nord*, *Von Borries*), ce dernier système évitant les condensations, donne une plus grande promptitude d'action.

On a longtemps discuté les avantages et les inconvénients que présentent les deux systèmes; M. A. Mallet a, en peu de mots, clairement résumé la question.

Les appareils automatiques permettent la mise en marche sans manœuvre spéciale, mais réduisent à un temps extrêmement court la période énergique d'action de la vapeur; les appareils non automatiques permettent de prolonger cette période pendant le temps nécessaire pour que la machine acquière sa pleine vitesse, et donnent d'ailleurs une certaine sécurité contre des accidents toujours possibles en cours de route, ainsi que l'expérience l'a déjà démontré. Les partisans des premiers reprochent aux seconds une certaine complication, la nécessité d'une manœuvre spéciale (qu'on peut éviter d'ailleurs) et surtout la possibilité qu'ont les mécaniciens de perdre de la vapeur en abusant du fonctionnement direct en dehors du démarrage.

On répond à cette objection « que les démarrages automatiques, simples au début, deviennent de plus en plus compliqués par les additions qu'on leur a fait pour leur donner la sécurité nécessaire et qu'ils le sont alors autant que les systèmes non automatiques; qu'ils nécessitent des tringles et des leviers comme les autres pour la même raison de sécurité; qu'à l'époque actuelle où on ne craint pas de surcharger les locomotives d'appareils complexes et les mécaniciens de manœuvres multiples, les uns et les autres souvent dans un but étranger au fonctionnement de la machine proprement dite, ce serait un scrupule exagéré que de supprimer des pièces très simples et une manœuvre insignifiante, telle que le simple déplacement d'un levier à chaque démarrage en privant la machine d'une partie de ses qualités essentielles. »

On est suffisammeut garanti contre la possibilité d'une perte de vapeur par un usage abusif de la marche en simple expansion, par les primes ou allocations payées aux mécaniciens.

D'ailleurs, malgré l'extrême ingéniosité déployée par les inventeurs de différents systèmes de valves automatiques, la question semble définitivement jugée aujourd'hui au profit des appareils non automatiques qui se répandent de plus en plus; M. Mallet, qui en a toujours été partisan et M. Von Borries qui a d'abord recommandé l'automaticité et s'est depuis rallié au système non automatique, prêtent à ce dernier l'appui de leur grande autorité.

120. Comparaison des différents types de locomotives compound, au point de vue de l'effort au démarrage. — Le volume des cylindres des machines à simple expansion est presque toujours assez grand pour assurer le patinage des roues au départ, même dans de bonnes conditions d'adhérence, lorsque le régulateur est ouvert en grand. On ne peut donc invoquer à ce point de vue la supériorité d'aucun système compound, par contre il est nécessaire, nous l'avons vu, dans la plupart d'entre eux, de prévoir un dispositif qui les mette, pour le démarrage, dans les mêmes conditions que les locomotives ordinaires. Il est intéressant de comparer à ce point de vue les principaux dispositifs de locomotives compound.

Dans les machines à deux cylindres munies d'une valve *non automatique*, (*Mallet*, *Von Borries*), avec échappement direct au dehors du petit cylindre, le démarrage s'effectue aussi bien qu'avec les locomotives à simple expansion. L'effort de traction *théorique* pourra même être plus élevé et on pourra profiter d'un accroissement exceptionnel du coefficient d'adhérence.

Avec les dispositions *automatiques* (*Worsdell*, *Player*, *Schenectady*, etc.), les choses se passent différemment. Supposons que, au départ, on introduise directement la vapeur dans la boîte du tiroir à haute pression, la valve d'interception se ferme et la contre-pression sur le petit piston sera plus grande que précédemment puisque, en admettant qu'il ne se produise

aucune fuite, le piston comprimera lors de sa première course, l'air ou la vapeur qui se trouvaient primitivement enfermés dans le réservoir intermédiaire. Le fonctionnement devient compound, la valve d'interception s'ouvrant, dès que la pression, en aval de cette valve est plus grande que celle qui règne dans la boîte du grand tiroir (ordinairement la moitié de la pression de la chaudière). Dès que le fonctionnement devient compound, et, dans les conditions normales il en est ainsi après un demi-tour de roue environ, l'effort de traction diminue et devient inférieur d'environ 20 0/0 à celui d'une machine ordinaire (fonctionnant avec les coulisses à fond de course et le régulateur suffisamment ouvert) possédant deux cylindres de même diamètre que le cylindre à haute pression de la machine compound considérée.

Dans le système *Lindner*, l'effort de traction au démarrage est à peu près le même que l'effort maximum obtenu avec le type précédent, mais il est moindre que dans la locomotive munie d'un échappement direct au petit cylindre.

Les locomotives compound *à trois cylindres* se trouvent sensiblement dans les mêmes conditions pour le démarrage que les machines à deux cylindres, quand elles comportent des bielles d'accouplement. Lorsqu'elles appartiennent au système Webb, elles se trouvent dans des conditions variables suivant la position relative des manivelles au moment du démarrage. L'effort de traction minimum est inférieur au minimum du type à deux cylindres et à réservoir.

Dans les machines à *quatre cylindres et à deux manivelles* (type *Woolf*), la variation des efforts moteurs, pendant un tour complet, ne diffère pas sensiblement de celle que l'on relève sur la locomotive à simple expansion, puisque, dans les deux types, la disposition des cylindres est symétrique de part et d'autre. Elle est cependant un peu moins marquée on le sait par suite de la plus longue admission dans chaque cylindre. L'effort de traction au démarrage sera plus grand que dans la locomotive à simple expansion, lorsque l'on admet directement la vapeur dans le cylindre de détente, surtout si le rapport des volumes des cylindres est élevé.

La locomotive *à quatre cylindres et à quatre manivelles* se trouve dans de meilleures conditions qu'aucune autre, au moment du démarrage, si on ménage un échappement éventuel direct du petit cylindre au dehors, parce que, au moment de la mise en route, elle aura toujours au moins un cylindre en pleine admission, et que les efforts moteurs sur les deux essieux seront maxima.

Si on ne dispose pas d'échappement direct aux petits cylindres et qu'on se contente d'une admission de vapeur vive aux grands cylindres, la machine du type considéré se trouvera, en ce qui concerne l'effort de traction initial,

dans des conditions analogues à celles des machines tandem, mais le démarrage pourra s'effectuer plus promptement, le calage relatif des manivelles étant ordinairement tel que deux cylindres au moins seront en admission pour toutes les positions et l'un d'eux en pleine admission.

121. Changement de marche. — Pour obtenir la marche la plus régulière et la plus économique, on doit chercher à répartir autant que possible, pour toutes les allures, dans les deux cylindres, la puissance développée et, pour cela, il est nécessaire de faire varier indépendamment les introductions dans les cylindres à haute et à basse pression.

Les premiers constructeurs de locomotives compound disposaient des changements de marche distincts pour les deux cylindres, laissant au mécanicien le soin de découvrir par la pratique quels étaient les crans de marche les plus propres à réaliser ce desideratum.

M. A. Mallet a d'abord employé un système permettant de varier l'introduction séparément dans chaque cylindre tout en laissant les deux distributions liées pour le mouvement de la machine. Cet appareil a été employé sur la machine d'essai de M. Borodine et sur la locomotive N° 701 du *Nord*. Cette disposition a été modifiée d'une manière ingénieuse par M. Borodine qui a employé pour le changement de marche une vis creuse contenant une seconde vis commandant la distribution du petit cylindre.

On peut craindre, avec un tel système, que les mécaniciens ne suivent pas à la lettre les instructions qui leur sont données et n'emploient pas, à l'un ou l'autre cylindre, les introductions convenables. C'est pourquoi divers ingénieurs, au nombre desquels M. Mallet lui-même, ont cherché à combiner des dispositifs permettant de faire varier automatiquement l'introduction dans les cylindres à haute et basse pression, autrement dit d'établir entre les deux distributions une liaison invariable mais assurant, dans les cylindres d'admission et de détente, une variation différente et convenable des distributions.

Ces appareils appartiennent à deux classes, suivant qu'ils présentent une série de combinaisons réglées d'avance et invariables, ou qu'ils peuvent aussi, au moyen d'une sorte de débrayage, permettre de régler à volonté les introductions.

M. von Borries réalise d'abord ce desideratum au moyen d'un calage différent des leviers de suspension des coulisses, répondant à une partie du programme mais sacrifiant la marche arrière. Depuis, on a créé plusieurs dispositifs donnant une solution plus ou moins exacte ou approchée. Nous décrirons les principaux d'entre eux qui sont des types *Mallet*, de *Glehn*, *P.-L.-M.*, lorsque nous étudierons séparément les systèmes compound auxquels ils s'appliquent.

122. Tracé des diagrammes. — Calcul des pressions moyennes. — Le tracé des diagrammes prévus, nécessaire pour l'établissement des machines marines, n'offre guère pour les locomotives, où le volume des cylindres se détermine surtout par comparaison, qu'un intérêt académique. Nous nous contenterons de renvoyer, pour l'étude de cette question théorique, à notre *Traité de la construction des machines à vapeur*[1] en ce qui concerne les machines à réservoir intermédiaire, ainsi qu'au *Traité de la machine à vapeur* de M. E. Sauvage[2]. La question des diagrammes des machines Woolf a été traitée très complètement par M. l'ingénieur en chef du Bousquet dans la *Revue générale des Chemins de fer*[3].

123. Résultats économiques donnés par l'application du système compound aux locomotives. — Bien que ne pouvant présenter, nous l'avons vu, une aussi grande économie pour les locomotives que pour les moteurs à condensation et particulièrement pour les machines marines qui comportent des distributions à tiroir du même type, parce qu'originairement elles étaient déjà plus économiques grâce à la grande vitesse du piston, la double expansion n'en donne pas moins dans la plupart des cas un bénéfice réel, comme le démontrent de très nombreux essais et des relevés effectués en service. Malheureusement, ces essais et ces comparaisons sont plus délicats en ce qui concerne les locomotives que les autres types de moteurs, à cause des difficultés plus grandes d'évaluer le travail utile ou développé, de relever exactement la consommation d'eau ou de combustible sur des machines que leur service appelle en des points différents (ce qui rend la surveillance et le contrôle moins aisés), en raison de la variation continuelle de la puissance et du peu d'analogie existant parfois dans les conditions du service, de la dissemblance des profils, de la nature variable du combustible, enfin des proportions différentes des machines plus ou moins propres à tirer avantage du perfectionnement considéré. Aussi les comparaisons ne peuvent-elles se faire qu'entre des locomotives similaires circulant sur les mêmes portions des réseaux, encore ne sont-elles pas toujours absolument concluantes.

Nous nous contenterons de citer les résultats de quelques-unes de ces expériences ramenant la consommation d'eau ou de charbon, les unes au train-kilomètre, les autres à la tonne-kilométrique les autres au cheval-indiqué ou effectif.

En Angleterre, les machines compound des systèmes Webb et Worsdell

[1] MM. Baudry et Cie.

[2] MM. Baudry et Cie.

[3] *Locomotive type Woolf à quatre cylindres et à huit roues couplées du chemin de fer du Nord*, (*Revue Générale*, numéro de novembre 1888.)

RÉSULTATS D'ESSAIS EFFECTUÉS SUR LES LOCOMOTIVES COMPOUND A GRANDE VITESSE
A QUATRE CYLINDRES, DE LA COMPAGNIE DU NORD

MACHINE N° 2121			MACHINE N° 2123		
Composition du train	Machine	48 t.	Composition du train	Machine	48 t.
	Tender (à moitié parcours)	29 —		Tender	30 —
	Voitures et fourgons	140 —		Voitures et fourgons	202 —
Poids total du train. P.		217 t.	Poids total du train		280 t.
Longueur du parcours. L.		131 km.	Longueur du parcours		153 km.
Différence d'altitude entre les points extrêmes. H.		— 20 m.	Différence d'altitude entre les points extrêmes		+ 20 m.
Mesures prises au chronomètre.	Durée totale du parcours	97′	Mesures prises au chronomètre.	Durée totale du parcours	132′
	Vitesse moyenne effective	83 km.		Vitesse moyenne effective	75 km
	Résistance moyenne en kilogrammes par tonne (mesures prises dans la pente de Chantilly). = R	7,35 kg.		Résistance moyenne en kilogrammes par tonne	5,6 kg.
	Travail total de la traction = P × L × R	208 938,4 tm.		Travail total de traction	239 904 tm.
	Vitesse amortie par les freins : à Amiens	15 m.		Vitesse amortie par les freins. à Creil	22 m.
				à Noyon	22-15 —
				à Saint-Quentin	22 —
	Travail total des freins $\frac{1}{2}\frac{P}{g}V^2$	2 488 tm.		Travail total des freins	17 510 tm.
	Travail de la gravité. P × H.	4 340 —		Travail de la gravité	5 600 —
	Travail effectif total développé par la machine	207 085,4 tm.		Travail effectif total développé par la machine	263 014 tm.
	Soit en chevaux-heures	766 chx.		Soit, en chevaux-heures	974 chx.
			Mesures prises au pédale dynamométrique.	Parcours effectué avec admission de vapeur = L′	130 km.
				Effort effectif moyen par tonne = π	7,04 kg.
				Travail effectif total = P × L′ × π	256 256 tm.
				Soit, en chevaux-heures	949 chx.
				Moyenne	961 chx.
Dépense en eau (arrosage déduit)		7 650 lit.	Dépense en eau (arrosage déduit)		9 500 lit.
Soit, par cheval-effectif et par heure		10,0 —	Soit, par cheval-effectif et par heure		9,9 —

Il n'a pas été fait de correction pour la faible perte d'eau résultant du fonctionnement de l'injecteur (système Sellers) et du frein à vide.

ont donné respectivement des économies de 23 et 25 0/0 dans leurs parcours d'essai, et de 10 à 15 0/0 en service.

En Allemagne, l'économie moyenne donnée par cent locomotives du système von Borries a été de 15, 20 0/0.

La *Compagnie du Nord* a effectué des essais sur les machines compound à grande vitesse et à quatre cylindres qui ont donné les résultats ci-contre, lesquels, remarquablement concordants, font ressortir la consommation brute de vapeur, par cheval-effectif et par heure, à 9,9 kg. et 10 kg.

Voici, d'autre part, le résultat d'essais comparatifs effectués par la même Compagnie sur les machines compound 2 121-2 122 et des locomotives ordinaires à cylindres égaux effectuant le même service [1] :

FÉVRIER, MARS ET AVRIL 1892				
NUMÉROS des machines.	COMBUSTIBLE PAR KILOMÈTRE			GRAISSAGE
	Briquettes.	Houille.	Total.	
	Kilogr.	Kilogr.	Kilogr.	Gr.
2 121-2 122 (Compound).	1,425	7,600	9,025	15,05
2 876-2 887 (Ordinaire).	1,920	8,630	10,550	17,30

Les machines compound ont donc fait preuve, dans la circonstance, d'une économie de 1,525 kg. de charbon par train-kilomètre soit de 14 0/0 environ. Cette économie ne peut toutefois pas être entièrement imputée au système compound, les nouvelles machines ayant des foyers plus profonds que les anciennes et mieux disposés au point de vue de l'utilisation du combustible.

La *Compagnie de Lyon* a entrepris en 1895 une série d'expériences très méthodiques, conduites avec toute la précision possible, sur ses nouvelles machines express compound à quatre cylindres (Mach. C. 21-60), qui ont donné les résultats principaux résumés au chapitre suivant.

L'examen des courbes de dépense de vapeur montre que, dans les limites où l'on s'est tenu dans les expériences, la dépense de vapeur par cheval-indiqué va légèrement en croissant si, laissant fixe l'introduction aux cylindres d'admission, on augmente l'introduction aux cylindres de détente, ce qui est bien conforme à ce que nous disions plus haut, mais, par contre,

[1] *La nouvelle locomotive compound à quatre cylindres et à grande vitesse de la Compagnie du Nord*, par M. l'ingénieur en chef du Bousquet (*Revue Générale des Chemins de fer*, juin 1892).

[2] Extraits de la note de M. Privat : *Expériences dynamométriques faites sur les dernières locomotives compound à grande vitesse de la Compagnie P.-L.-M.* (*Revue Générale des Chemins de fer*, numéro de mars 1896).

que la dépense de vapeur par cheval-effectif va en diminuant. Cette diminution, faible à la vitesse de 60 km. à l'heure, devient extrêmement importante à la vitesse de 90 km. et s'élève à :

18 0/0 pour la marche au cran		4	aux petits cylindres
23 —	—	3	—
54 —	—	2	—

lorsque l'on passe du cran 4 au cran 7 aux grands cylindres.

Cette anomalie ne s'explique pas très bien. La Compagnie, à l'heure où nous écrivons, poursuit des recherches ayant pour objet de déterminer la cause à laquelle on doit imputer l'accroissement considérable des résistances passives, quand on diminue l'introduction au grand cylindre.

On trouvera dans un autre chapitre des tableaux résumant, d'après ceux de M. Privat, les principaux résultats d'essais effectués sur les locomotives en question. Les poids de vapeur donnés sont relatifs à la *vapeur sensible*, d'après les indications du diagramme ; ils sont donc notablement plus faibles que ceux relatifs aux autres essais.

Les machines compound à marchandises de la Compagnie de *Lyon* ont donné, tant lors de leurs essais qu'en service courant, une économie moyenne de 12 à 15 0/0, suivant les sections considérées.

Les locomotives compound à grande vitesse de la Compagnie du *Midi* essayées concurremment avec les locomotives à simple expansion (type 800) de la Compagnie de l'*Est*, effectuant le même service, ont fait preuve d'une économie brute qui ne dépasse pas 6 à 7 0/0.

M. Borodine a entrepris, aux chemins de fer S. O. de la Russie[1], une série d'expériences comparatives sur des machines compound et à simple expansion, semblables sous les autres rapports. Nous résumons les résultats donnés par une partie de ces essais :

	TIMBRE	CONSOMMATION de vapeur par cheval indiqué.	ÉCONOMIE p. 100 en faveur des machines compound.
	Kg.	Kg.	
Machine compound (Mallet).	12	10,10	13,3
Machine ordinaire	10	12	»
Machine compound (4 cylindres)[1]. . .	14	9	25

[1] La perte de vapeur par les soupapes a été évaluée de 7 à 8 p. 100, ce qui semble exagéré.

Des essais effectués récemment sur le réseau de l'*État prussien* ont donné

[1] *Revue Générale des Chemins de fer*, numéro de décembre 1886, p. 317.

les consommations relatives suivantes pour un million de kilogrammètres (travail utile) :

Locomotive non compound à 4 essieux, n° 1	6,70 kg.
— — à 3 essieux, n° 7	6,05 —
Locomotive compound n°s 4 et 8.	4,88 —

soit une diminution de consommation de 19 à 27 0/0, en comparant la dernière locomotive avec les machines 7 et 1, et de 10 0/0, en comparant la machine n° 7 à la machine n° 1.

M. Urquhart, ingénieur en chef du chemin de fer du *Sud-Est russe*, a publié en 1890, dans les *Proceedings* de la Société des Mechanical Engineers de Londres, un mémoire sur les essais effectués par lui avec des locomotives compound chauffées au pétrole et des locomotives ordinaires du même type. Ces essais ont été conduits dans les meilleures conditions qu'il a été possible de réaliser pour assurer la précision des mesures et la valeur des comparaisons. L'économie de combustible a été de 18,22 0/0 pour les locomotives à voyageurs et de 19 0/0 pour les locomotives à marchandises (minimum 14,8 0/0 et maximum 25,6 0/0). D'autres essais, qui ont porté sur la consommation de vapeur, ont révélé une économie de 27 0/0 en moyenne.

D'autre part, des locomotives compound à quatre roues accouplées mises en service en 1889 par les chemins de fer de l'*Etat wurtembergeois*, comparées à des locomotives ordinaires du même type n'ont donné qu'une économie de charbon de 0,49 kg. par kilomètre, soit 5,64 0/0.

Les machines express compound à deux cylindres, système Golsdörf, de l'*Etat autrichien*, ont atteint une vitesse de 105 km. à l'heure en palier avec un train de 140 t. nettes et ont développé une puissance de 1 000 chevaux correspondant à une consommation de vapeur de 9,45 kg. par cheval-indiqué. Elles ne sont malheureusement pas comparables aux autres machines non compound de la même Administration.

Des essais comparatifs[1] effectués en 1890 aux Etats-Unis sur une machine compound construite par les ateliers de Rhode-Island et sur une machine ordinaire du même type ont permis de relever une économie de combustible de 38 0/0 et une économie de vapeur de 23 à 26 0/0.

Un grand nombre d'essais comparatifs ont été effectués en service courant sur des locomotives compound du type Vauclain[2] employées aux Etats-Unis, à quatre, six et huit roues accouplées. Les machines compound, travaillant dans des conditions identiques, ont accusé une réduction de la consommation de combustible qui a varié de 16,6 0/0 à 38 0/0 et même exceptionnellement

[1] *Railroad Gazette* du 9 janvier 1891.

[2] Voir notre article sur les *Locomotives compound du système Vauclain* (*Revue Générale des Chemins de fer*, numéro de mai 1896).

à 44 0/0. La consommation de vapeur brute par cheval-indiqué a été en moyenne de 10,5 kg. Ces expériences ont donné des résultats d'économie supérieurs à ceux que l'on a relevés en Europe, ce qui tient à ce que les locomotives américaines non compound, fonctionnant normalement avec de très grandes introductions et un violent tirage, sont peu économiques. La vaporisation y est ordinairement poussée jusqu'aux dernières limites et le système compound entraîne dans l'espèce une seconde économie, parfois supérieure à la réduction dans la consommation de vapeur seule. Ainsi, dans un des essais précités qui a été effectué sur une machine à six roues accouplées du *Northern Pacific*, l'économie totale de combustible a été de 27,3 0/0, tandis que l'économie de vapeur n'a été que de 9,4 0/0 ; cette faible diminution de la production aurait été suffisante pour accroître de 17,9 0/0 le rendement de la chaudière qui se trouve à la limite de sa capacité.

M. P.-W. Dean, dans son étude sur les locomotives compound présentée en 1896 à la société américaine des Mechanical Engineers, a cité le cas de deux machines, identiques sous tous les autres rapports, mais réglées, pour les besoins de l'expérience, de manière à fonctionner avec le même rapport de détente, dont l'une était du type compound, consommant respectivement 12,5 kg. et 8,75 kg. de vapeur par cheval-indiqué, soit une économie de 29 0/0 en faveur de la compound.

M. J.-H. Cooper a publié récemment[1] un rapport donnant quelques chiffres intéressants résumant les résultats obtenus en 1896 sur douze locomotives compound à deux cylindres et une machine à simple expansion semblable sous les autres rapports et effectuant le même service. Les compounds avaient des cylindres de 0,533 et 0,788 m. de diamètre et une course de 0,610 m. La locomotive à simple expansion avait des cylindres de 0,553 × 0,610 m.

	MAI 1896 LOCOMOTIVE Type Consolidation.		JUIN 1896 LOCOMOTIVE Type Consolidation.	
	Compound.	Ordinaire.	Compound.	Ordinaire.
Parcours (service des marchandises). . km.	26586	3903	21690	2940
Parcours par litre d'huile, aux cylindres. —	150	246	179	112
— — à la machine. —	60	42	50	41
Consommation de combustible par véhicule-kilomètre (wagon chargé) . . . . . kg.	0,960	1,256	0,966	1,211
Parcours par tonne de combustible. . km.	34	27,6	39,7	25

D'autres essais ont porté sur des locomotives à six roues accouplées et à

[1] *Journal of the Franklin Institute.*

bogie et des locomotives du type Consolidation, ayant des cylindres répondant aux dimensions suivantes :

Machines à bogie. . . .	Compound. . .	0,483 m. et 0,686 m. × 0,620 m.
	Ordinaires. . .	0,508 m. × 0,620 m.
Machines Consolidation.	Compound. . .	0,524 m. et 0,736 m. × 0,640
	Ordinaires. . .	0,508 m. × 0,620 m.

Les résultats obtenus sont résumés ci-dessous :

I. — MACHINES A BOGIE

	PARCOURS	VÉHICULES kilomètres.	NOMBRE moyen de véhicules par train.	CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE	
				Totale.	Par véhicule kilomètre.
				Kg.	Kg.
Compound (1 machine)	77 441	409 268	5,17	951 612	2,325
Non compound (2 machines) . .	173 635	909 632	5,23	1 008 448	3,123
Economie 0 kg., 798, par véhicule kilomètre, soit, 25,56 p. 100.					

II. — MACHINES TYPE CONSOLIDATION

	PARCOURS	VÉHICULES kilomètres.	NOMBRE moyen de véhicules par train.	CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE	
				Totale.	Par véhicule kilomètre.
				Kg.	Kg.
4 ordinaires 6 mois	130 774	2 149 322	16,43	3 743 349	1,727
4 — 5 mois	98 722	1 917 101	19,41	2 711 583	1,416
Total 11 mois	229 496	4 066 523	17,23	6 454 932	1,587
2 compound 6 mois	44 568	797 031	17,88	1 113 199	1,396
2 — 5 mois	50 796	1 146 789	22,57	1 209 980	1,055
Total 11 mois	95 364	1 943 820	20,38	2 323 179	1,195
Economie 0 kg., 392, soit 24,70 p. 100.					

En ce qui concerne les frais d'entretien, le relevé suivant donne les résultats d'une expérience de six mois :

		ORDINAIRES	COMPOUND
Parcours en 6 mois	km.	124 691	63 221
Montant des frais de réparations	fr.	6 826	3 186
Prix de revient par kilomètre.	—	0,055	0,050

Le même rapport renferme les résultats donnés par une autre Compagnie américaine faisant ressortir le bénéfice dû au système compound à 19 0/0 de la dépense de combustible et de 17 0/0 sur la dépense d'eau.

Une Compagnie annonce pour les compounds une économie d'huile de graissage de 17 0/0, et une autre un excès de consommation de 13 0/0.

Il semble que l'on peut en résumé considérer que la consommation de vapeur dans les locomotives compound varie entre 8,5 et 9 kg. de vapeur brute par heure et par cheval-indiqué sur les pistons. La consommation de vapeur par cheval-effectif à la jante, dans les locomotives compound, peut descendre à 9,5 ou 10 kg.; les meilleures locomotives des types ordinaires consomment au minimum de 11 à 12 kg.

D'après les chiffres que l'on trouvera dans le chapitre relatif à l'utilisation des locomotives, la dépense de vapeur par cheval est de 12,7 kg. en moyenne pour les machines à simple expansion et de 9,97 kg. pour les locomotives compound (en ne comptant pas les machines de la Compagnie de *Lyon* dont la consommation est évaluée en *vapeur sensible*). C'est une économie de 21 0/0.

L'économie de combustible entraînée par l'emploi du système compound (en Europe) paraît d'après les expériences connues qui ont porté sur la consommation de charbon et non de vapeur, varier entre 5 et 25 0/0, soit 15 0/0 en moyenne.

Les résultats obtenus sont, on le voit, très peu concordants. Certains réseaux annoncent une économie considérable, se montant parfois à plus de 30 0/0; d'autres constatent une économie assez faible de 6 à 10 0/0; d'autres, enfin, n'en ont trouvé aucune digne d'être notée. Il est donc très difficile de conclure.

Les locomotives compound ne sont pas encore entrées dans la pratique des chemins de fer depuis assez longtemps pour que l'on puisse connaître exactement la mesure dans laquelle l'économie de charbon qu'elles procurent est diminuée dans la réalité par l'accroissement du prix de premier établissement et des frais d'entretien pouvant résulter de la plus grande complication ou décider si, au contraire, comme le pensent certains partisans du système, ces frais d'entretien se trouvent réduits par quelques-uns des avantages du mode compound relativement à la division des efforts et à la fatigue un peu moindre des chaudières.

124. Résumé des avantages et des inconvénients que présente le système compound dans son application aux locomotives. — Nous avons vu qu'il existe encore de grandes divergences d'opinions en ce qui concerne, non pas le principe compound lui-même, dont personne ne discute plus les avantages économiques et pratiques, mais *son application à la locomotive.*

Nous nous contenterons de résumer les avantages et les inconvénients qu'il présente dans ce cas. Il nous paraît difficile de se prononcer d'une manière absolue sur la question, le bénéfice que l'on peut retirer du système consistant dans la différence entre les avantages et les inconvénients affectés de coefficients variables suivant les circonstances. Il appartenait aux ingénieurs, chargés d'étudier des machines pour un service déterminé, d'apprécier l'opportunité de l'application du mode compound.

Les avantages peuvent se résumer comme suit :

1° La dépense de vapeur par cheval-indiqué est moins grande que dans les machines à simple expansion parce que :

(*a*). La pression de marche peut être plus élevée et la détente prolongée davantage sans qu'il se produise des condensations intérieures susceptibles de réduire, dans une proportion considérable, le bénéfice obtenu par le plus grand écart total des températures du fluide à son entrée et à sa sortie du groupe des cylindres. On peut donc profiter dans une plus large mesure des avantages thermodynamiques que présentent les hautes pressions.

(*b*). Les fuites des tiroirs ou des pistons se trouvent réduites par suite de la diminution de la différence des pressions, dans chaque cylindre, entre l'admission et l'échappement.

(*c*). La vapeur provenant de fuites autour du petit piston ou de réévaporations à la fin de la course dans le cylindre à haute pression, est utilisée dans le grand cylindre.

(*d*). Il est possible d'opérer gratuitement, dans la boîte à fumée un certain réchauffage de la vapeur à son passage du petit ou grand cylindre.

2° La dépense de combustible est diminuée dans une mesure un peu plus grande que la consommation de vapeur, la chaudière, à puissance égale, se trouvant moins surmenée.

3° Comme conséquence de la réduction du poids de vapeur nécessaire par unité de puissance, une chaudière de capacité donnée pourra, toutes choses égales d'ailleurs, fournir un travail plus considérable.

4° Le rendement mécanique est un peu meilleur à cause de la diminution des efforts initiaux sur les pistons, et de la grande régularité des couples moteurs qui réduisent aussi la tendance au patinage.

5° Le laminage de la vapeur est diminué et l'échappement anticipé conserve une valeur modérée, l'introduction dans chaque cylindre restant toujours assez grande bien que le degré total de détente soit élevé.

6° On peut opérer une détente nominale de 6 à 7 volumes (pratiquement à cause du laminage de 8 à 9 volumes) en employant des distributions ordinaires par tiroir simple et coulisse.

7° La marche s'effectue avec une détente relativement grande même pour la marche au dernier cran, soit peu après le démarrage, soit à la montée des

rampes, le degré d'expansion étant nominalement égal, si on ne tient compte ni des espaces morts ni du laminage, au quotient du volume des cylindres par l'introduction en centièmes au petit cylindre.

8° La puissance peut être répartie (si l'on emploie plus de deux cylindres) sur deux essieux, ce qui est favorable à la conservation des machines et des voies.

D'autre part, les inconvénients principaux sont les suivants :

1° Difficulté du démarrage exigeant l'addition de valves spéciales et nécessitant une manœuvre supplémentaire du mécanicien quand leur fonctionnement n'est pas automatique.

2° Plus grandes surfaces refroidissantes exposées à l'action de la vapeur, qui tendent à diminuer le bénéfice dû à la réduction des chutes de température dans chaque cylindre.

3° Compression excessive dans les cylindres à haute pression. (C'est là un inconvénient peu sérieux, car on peut y remédier en augmentant le volume des espaces morts.)

4° Chute de pression inévitable entre les deux cylindres.

5° Complication plus grande : ou le nombre des cylindres est supérieur à deux, ou il faut disposer d'une valeur de démarrage assez complexe.

6° Augmentation du poids.

7° Augmentation des dépenses de premier établissement. (Les dépenses d'entretien peuvent ne pas être plus élevées, malgré l'accroissement du nombre des organes par suite de la réduction des efforts initiaux et de la régularité plus grande des moments moteurs entraînant une usure moindre.)

8° Nécessité d'une surveillance plus grande et d'une plus grande dépense d'huile quand il y a plus de deux cylindres.

Aux yeux de beaucoup d'ingénieurs, les avantages l'emportent sur les inconvénients et leur valeur relative augmentera à mesure que l'on sera amené à construire des locomotives plus puissantes. Déjà, sur plusieurs de nos réseaux le service des trains les plus rapides est effectué presque exclusivement par des locomotives compound à quatre cylindres.

DESCRIPTION DES PRINCIPAUX SYSTÈMES ADOPTÉS

POUR L'APPLICATION

DU MODE COMPOUND AUX LOCOMOTIVES

125. Nous allons maintenant décrire avec quelques détails les principaux systèmes qui ont été réalisés dans la pratique pour l'application du mode

compound aux locomotives et dont quelques-uns sont certainement appelés à se répandre.

Ces systèmes diffèrent surtout par le nombre et la disposition des cylindres et par le type d'appareil de démarrage adopté. Dans les locomotives compound à deux cylindres, les valves de démarrage sont *automatiques* ou non *automatiqnes* (Voir ci-dessus). Dans les machines à trois ou quatre cylindres, elles sont plus simples et jamais automatiques.

Nous examinerons successivement les locomotives compound à *deux, trois* et *quatre cylindres.*

LOCOMOTIVES COMPOUND A DEUX CYLINDRES

126. Les locomotives compound à deux cylindres peuvent se diviser en trois catégories :

1° Les deux cylindres peuvent recevoir chacun la vapeur de la chaudière et la rejeter directement dans l'atmosphère, en fonctionnant à volonté, à simple ou à double détente.

2° Les deux cylindres peuvent recevoir chacun la vapeur de la chaudière; entre les deux cylindres se trouve une valve interceptrice séparant les deux cylindres au moment du démarrage.

3° Les deux cylindres peuvent recevoir directement la vapeur vive, il n'y a ni valve d'interception ni échappement direct du petit cylindre.

Nous décrirons ci-après les dispositifs les plus connus et ceux surtout qui ont reçu le plus grand nombre d'applications. Nous ne suivrons pas nécessairement l'ordre indiqué par la classification ci-dessus.

127. Système A. Mallet. — Les machines à deux cylindres du système Mallet sont munies d'un appareil de démarrage non automatique, ordinairement placé sur le côté de la boîte à fumée et dont le jeu, déterminé par le mécanicien, permet à la machine de fonctionner avec admission au petit cylindre seul ou avec admission directe et échappement direct pour les deux cylindres, la pression étant réduite, dans ce cas, sur le grand piston, au moyen d'un étranglement ou par l'emploi d'un détendeur.

Le premier appareil usité par M. Mallet, combinant en une seule valve interceptrice et valve de démarrage, était un peu volumineux; il a été remplacé, dès 1884, par un dispositif moins encombrant et dont le mouvement s'opère, sans manœuvre de force, par le mécanicien lui-même.

La figure 278 représente le dispositif Mallet, tel qu'il a été appliqué en 1887-1888 à une machine à 6 roues accouplées, type Bourbonnais, du *Jura Simplon.* Au démarrage, le mécanicien manœuvre le tiroir du régu-

lateur auxiliaire, une lumière est ainsi démasquée et permet l'admission directe de la vapeur de la chaudière au réservoir intermédiaire, la face avant du clapet *c* communique avec l'atmosphère par le tuyau *m* et le trou du régulateur auxiliaire; la pression étant ainsi réduite derrière le clapet *c*, le grand clapet C vient s'appliquer sur son siège, et y est maintenu par la pression de la vapeur renfermée dans le réservoir intermédiaire; la vapeur du petit cylindre s'écoule directement dans l'échappement et la machine fonctionne à la manière ordinaire. Pour passer de la marche à simple expansion à la marche en compound, le mécanicien masque les lumières du tiroir auxiliaire en agissant sur la tige de manœuvre; la vapeur de la chaudière, ne pouvant plus pénétrer directement dans le réservoir intermédiaire, arrive sur la face du petit clapet *c*; le clapet C est alors repoussé de son siège; la vapeur venant du petit cylindre passe dans le réservoir intermédiaire et de là dans le grand cylindre, au lieu de s'échapper directement dans l'atmosphère. La pression dans la valve interceptrice est limitée à 5 kg. par une soupape de sûreté.

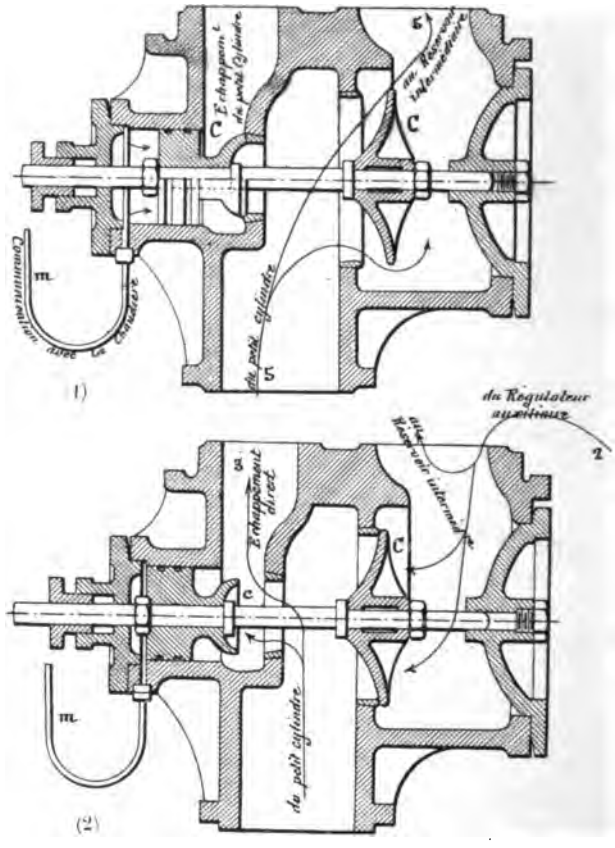


Fig. 278. — Valve de démarrage, système Mallet.
(1), Marche en compound. — (2), Marche ordinaire.

Dans les machines à deux cylindres d'une certaine puissance, on ne peut, pour éviter d'attribuer un diamètre excessif au grand cylindre, adopter un rapport de volumes suffisamment élevé pour donner aux deux cylindres des admissions égales. Pour résoudre ce problème, M. A. Mallet a imaginé un dispositif ingénieux composé d'un système de leviers différentiels qui a donné toute satisfaction et a reçu plusieurs applications (*Jura Simplon; Etat prussien*, etc.).

M. Mallet avait prévu, dès 1879, la possibilité, pour remédier à la difficulté relatée plus haut et provenant, dans les machines à deux cylindres, du diamètre excessif que l'on peut être conduit à donner au grand cylindre une

disposition dans laquelle le cylindre unique de détente se trouvait remplacé par deux cylindres plus petits, égaux, placés parallèlement l'un au-dessus de l'autre et dont les pistons actionnaient une crosse commune. Cette disposition a été depuis appliquée par M. Lapage et par M. Vauclain, mais ce dernier emploie des cylindres inégaux, l'un à haute, l'autre à basse pression.

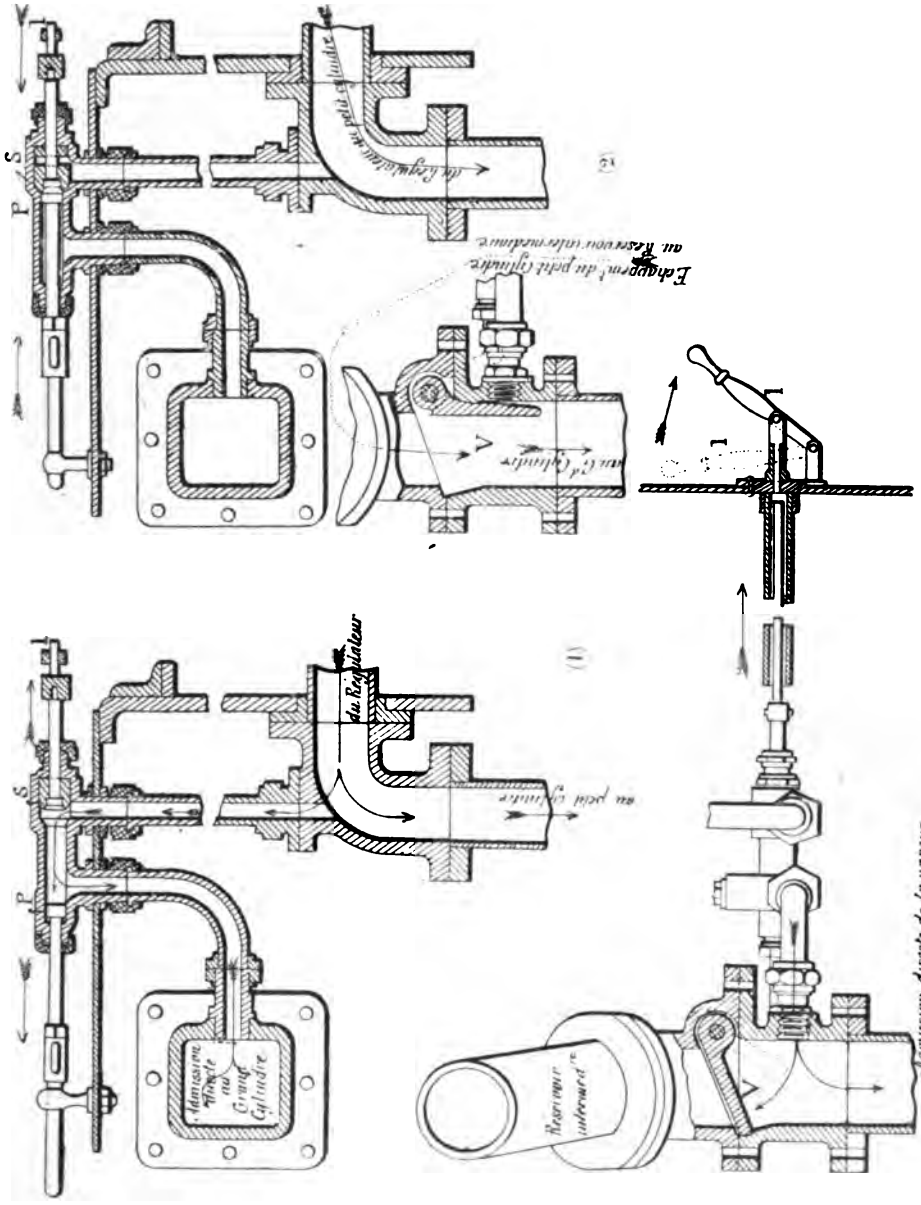


Fig. 270. — Valve de démarrage et soupape interceptrice du système *Worsdell*.
1, Marche ordinaire. — 2, Marche en compound.

128. Système Worsdell. — M. Worsdell a appliqué, dès 1885, à une machine express à bogie du *Great Eastern Railway*, un dispositif semi-

automatique de son invention auquel il donna plus d'extension dans la suite, après l'avoir d'ailleurs modifié, lorsqu'il devint ingénieur en chef du *North Eastern*. Il construisit, de 1888 à 1893, plusieurs types de machines compound de son système, particulièrement des express à roues libres et à quatre roues accouplées. Ce système a été aussi appliqué, en 1891, à une machine à marchandises du *Great Eastern Ry*. Depuis la mort de M. Worsdell, survenue en 1894, la Compagnie n'a mis en service, au début, que quelques machines compound et n'en construit plus maintenant. On a même ramené au fonctionnement ordinaire la plupart des compounds de ce système.

Le système de M. Worsdell (fig. 279) est caractérisé par les points suivants :

Lors du démarrage, le mécanicien manœuvre un levier L ; la soupape S s'ouvre et permet à la vapeur venant du régulateur de pénétrer directement dans le grand cylindre en repoussant le petit piston de démarrage P ; la valve de communication V entre les deux cylindres se trouve en même temps fermée, de sorte que la vapeur d'échappement du petit cylindre ne peut pénétrer dans le cylindre de détente. Dès que le démarrage est opéré, le mécanicien passe de la marche ordinaire à la marche en compound en manœuvrant le levier *l*; la vapeur d'échappement du petit cylindre peut alors sortir du réservoir intermédiaire et ouvrir la valve V pour pénétrer dans le cylindre de détente : le tiroir de démarrage P est alors ramené automatiquement à la position qui correspond à la marche en compound. Les plateaux du grand cylindre sont munis de soupapes de sûreté chargées à 7 kg. ; le timbre de la chaudière est de 12,5 kg. Cette valve de démarrage est donc semi-automatique, puisque le mécanicien doit manœuvrer un levier pour changer le mode de fonctionnement de la machine ; elle est plus simple que la valve primitive des machines du *Great Eastern*, qui comportaient deux leviers de commande, un pour la soupape de démarrage proprement dite et un second pour la soupape interceptrice.

M. Worsdell a, dans la suite, apporté à sa valve interceptrice quelques modifications de détail qui la rapprochent du système von Borries.

129. Système von Borries. — M. von Borries a été nous l'avons vu, après M. A. Mallet, un des promoteurs de l'application du principe compound aux locomotives. Il a toujours donné la préférence au système à deux cylindres. Cet ingénieur employa d'abord un appareil de démarrage automatique de son invention, mais il reconnut dans la suite les avantages des dispositifs non automatiques qu'il applique aujourd'hui d'accord avec M. A. Mallet.

Dans la première disposition automatique (fig. 280), la valve de démar-

rage était placée dans le réservoir intermédiaire R. Au moment du démarrage, le mécanicien appliquait le clapet C sur son siège au moyen de la tige de commande T ; l'accès du réservoir intermédiaire était aussi fermé, et la vapeur de la chaudière pénétrait directement, par B, au grand cylindre, avec une pression réduite dans les rapports des volumes du petit cylindre au grand, de manière à égaliser les efforts développés par les deux cylindres. Dès que la machine avait parcouru quelques mètres, la pression de la vapeur d'échappement du petit cylindre, accumulée dans le réservoir intermédiaire, devenait assez forte pour repousser le clapet C vers la gauche ; la vapeur de la chaudière ne pouvait plus pénétrer dans la capacité E, par l'orifice O, qui était fermé, et la vapeur d'échappement du petit cylindre pouvait passer du réservoir intermédiaire au grand cylindre ; la soupape C était maintenue en place, pendant la marche en compound, grâce à la différence des pressions exercées par la vapeur de la chaudière sur le siège de la soupape (39 mm.) et sur la partie renforcée de sa tige (45 mm.). Les détentes, correspondant dans les deux cylindres aux différents crans de la marche avant, étaient réglées au moyen d'un système de deux leviers calés, sous un angle convenable, sur l'arbre de relevage, de manière à égaliser autant que possible les efforts développés par les deux cylindres.

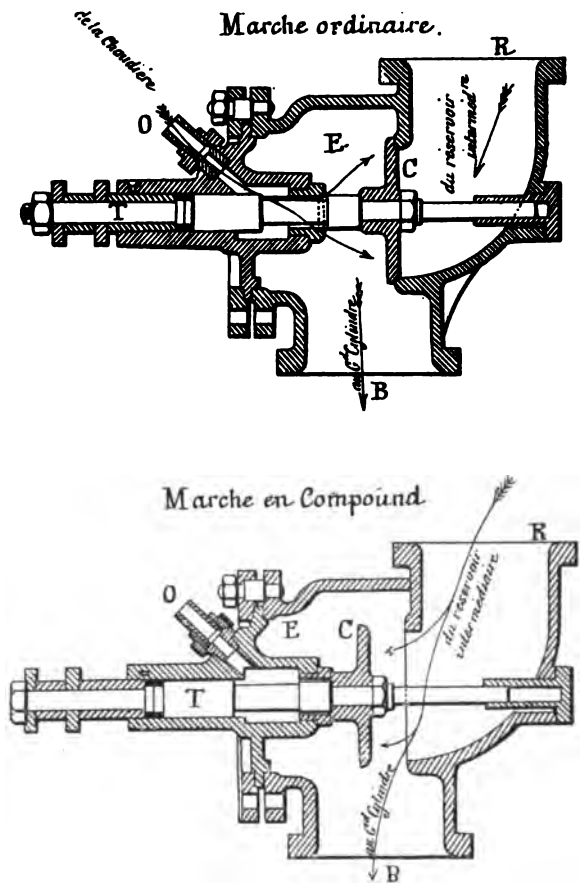


Fig. 280. — Valve de démarrage *Von Borries* (automatique).

Un certain nombre de locomotives à six roues couplées de l'*Etat prussien*, construites par la Société hanovrienne de Linden, sont munies d'une valve automatique de M. von Borries, modifiée par M. Lapage. Cette valve se rapproche beaucoup de celle de M. Worsdell. Au moment du démarrage, la vapeur à haute pression se rend directement à la boîte à tiroir du grand

cylindre ; dès que la vapeur d'échappement du petit cylindre a atteint, dans le réservoir intermédiaire, une pression suffisante, elle repousse une soupape ; les pistons A sont refoulés et forment les orifices. La pression de la vapeur, dans la boîte à tiroir du grand cylindre, est limitée par une soupape de sûreté.

La nouvelle valve non automatique de M. von Borries, qui se rapproche de l'appareil de démarrage de M. A. Mallet, a été appliquée à un certain nombre de machines à marchandises et de locomotives express des chemins de fer de l'*Etat de Hanovre* (fig. 281).

Deux pistons K et *k*, reliés l'un à l'autre par la tige S, peuvent se mouvoir dans une boîte placée entre les cylindres à haute et à basse pression ; cette

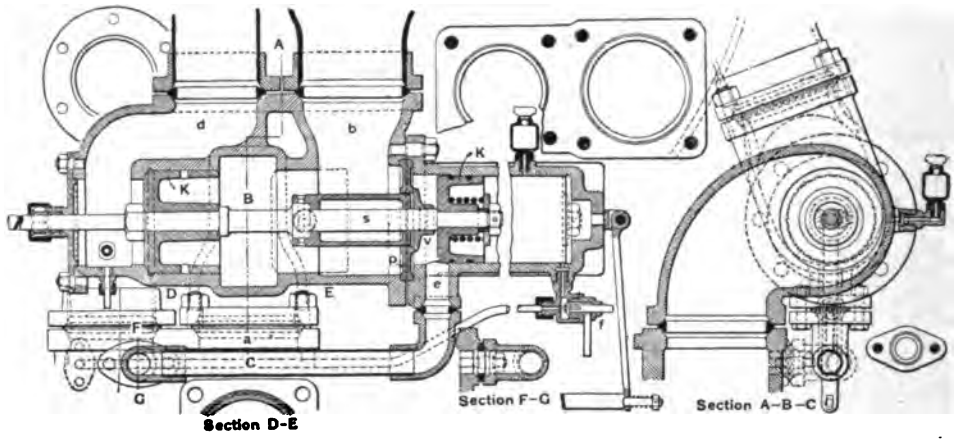


Fig. 281. — Valve de démarrage, système *Von Borries*.

boîte communique par *d* avec le tuyau d'échappement du cylindre à haute pression, par *b* avec le réservoir intermédiaire, par *d* avec l'échappement et par *e* avec le tuyau de prise de vapeur, que le mécanicien peut mettre en communication avec l'arrière du petit piston *k*, au moyen de la soupape *f*, commandée par un levier de manœuvre.

Pour la marche en compound, on introduit la vapeur derrière le piston *k* en ouvrant la soupape *f*, et les deux pistons occupent la position indiquée par la figure ; la vapeur, venant par *a* du cylindre à haute pression, se dirige par *b* vers le grand cylindre, d'où elle sort pour s'échapper dans l'atmosphère,

Si l'on veut rétablir le fonctionnement ordinaire, on ferme la soupape *f*, la vapeur qui se trouvait derrière le piston *k* s'échappe dans l'atmosphère, et les deux pistons K et *k* sont amenés dans la position contraire qui permet à la vapeur vive de pénétrer dans le réservoir intermédiaire *b*, par l'orifice *e*, et de là dans le grand cylindre. Les pressions qui s'exercent sur les deux pistons K et *k* sont proportionnelles aux surfaces de ces pistons qui agissent ainsi comme régulateurs de pression, de sorte que la vapeur pénètre

dans le grand cylindre avec une pression réduite et y exerce un effort très approximativement égal à celui du petit cylindre, dont la vapeur s'échappe directement par *a* et *d*. On revient à la marche en compound en ouvrant simplement la soupape *f*. On peut donc modifier le fonctionnement de la machine à un moment quelconque de la marche.

Le *Pensylvania Railroad* a appliqué, en 1895, avec quelques modifications, le système Von Borries, concurremment avec d'autres systèmes à de puissantes locomotives du type Mogul. Un robinet à trois voies, placé dans l'abri, à la main du mécanicien, est relié par un tuyau avec le réservoir du frein, et par un autre tuyau avec un appareil de démarrage placé sur l'avant des cylindres et que l'on trouve en coupe figure 282. Les organes

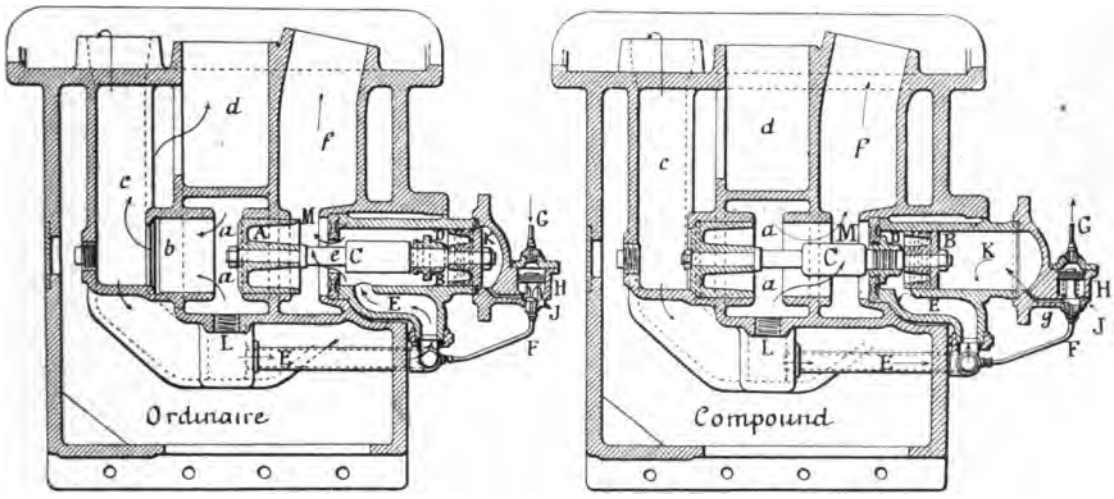


Fig. 282. — Valve de démarrage, système *Von Borries* (*Pensylvania Railroad*).

sont représentés dans la position qu'ils occupent lorsque la machine fonctionne à simple expansion et en compound. La cavité *a* est directement reliée à l'échappement du petit cylindre. Quand les organes sont dans la position de la figure de droite, la vapeur d'échappement du cylindre à haute pression passe dans le réservoir dans la direction des flèches. Les organes mobiles sont fixés dans cette position par suite de la pression de la vapeur à l'intérieur du cylindre K.

Pour ramener, au moment du démarrage, le fonctionnement au mode ordinaire, on envoie, au moyen du robinet de manœuvre, de l'air comprimé qui pénètre dans la boîte à clapets H renfermant un petit piston relié par une tige à une soupape à double siège. L'air comprimé repousse le piston vers le bas, ce qui ferme la soupape et la communication avec le tuyau F. A ce même moment, la partie supérieure de la soupape est détachée de son siège, et met le cylindre K en communication avec l'atmosphère par l'ori-

fice J. L'extrémité opposée du cylindre K reçoit directement la vapeur vive par le conduit E. Cette vapeur, qui agit sur l'autre face du piston différentiel B, le repousse vers la droite aussitôt que l'échappement est ouvert de ce côté. Dès lors, la soupape A reliée par une tige au piston B est décalée de son siège, ce qui met en communication la capacité *a* avec la culotte *d*, et l'échappement du petit cylindre s'opère directement dans l'atmosphère, dans le sens des flèches. En même temps, la vapeur vive s'introduit par les tuyaux et le conduit E et par la capacité annulaire restée vide autour de la tige *e* des soupapes, à l'intérieur du réservoir intermédiaire, et à une pression réduite à cause de la faible section de passage. En même temps, la soupape-piston A empêche cette vapeur vive de s'écouler dans l'atmosphère.

Les choses restent dans cet état jusqu'au moment où, à l'aide du robinet du mécanicien, on fait évacuer l'air de la boîte à clapet H, ce qui permet à la vapeur, la soupape à double siège étant aussi soulevée, de s'introduire à nouveau dans le cylindre K, ce qui ramène la soupape de démarrage A dans la première position, le fonctionnement redevenant compound.

130. Système Lindner. — Les chemins de fer de l'*Etat saxon* possèdent un certain nombre de locomotives à voyageurs et à marchandises du système

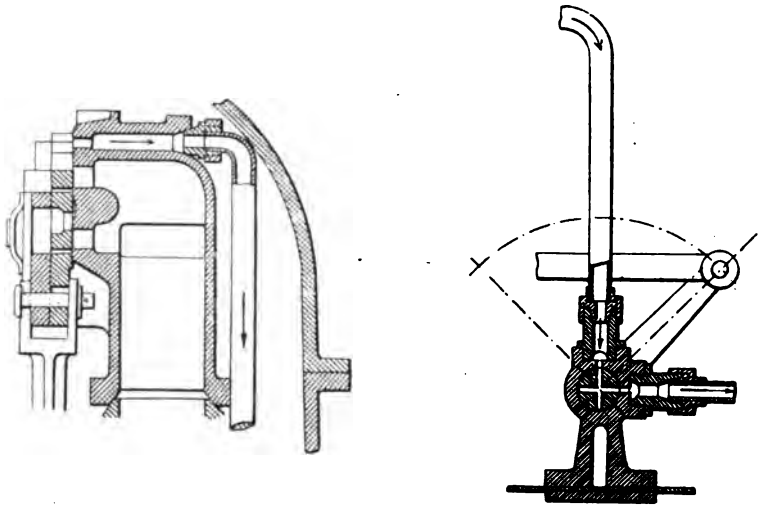


Fig. 283. — Dispositif de *Lindner*.

compound à deux cylindres extérieurs, avec chaudières timbrées à 12 kg. Ces machines avaient été munies, à l'origine (1885 à 1887), de valves de démarrage automatique du système von Borries. En 1888, M. Lindner fit appliquer à une machine à voyageurs, ainsi qu'à une machine à marchandises, une valve de démarrage de son invention, dont l'emploi a été étendu depuis aux

autres machines ; ce système de valve a été expérimenté, en Amérique, par le *Pensylvania Railroad* et par le *Chicago Burlington and Quincy Railroad.* Un petit tuyau (fig. 283), reliant le réservoir intermédiaire et le tuyau de prise de vapeur, porte la valve proprement dite, constituée par un robinet à quatre voies. Ce robinet est manœuvré par le mécanicien, en même temps que l'appareil de changement de marche, auquel il est relié par des leviers : deux orifices rectangulaires sont ouverts pour les deux positions extrêmes, et fermés pour la position intermédiaire.

Pour démarrer, le mécanicien met son levier de changement de marche à fond de course ; le boisseau du robinet à quatre voies est amené dans une position telle que la vapeur est admise directement du régulateur au réservoir intermédiaire, et, de là, au grand cylindre. Pour éviter les contre-pressions derrière le petit piston, le tiroir est percé de deux orifices de faible section (environ 1 cm^2) qui permettent à la vapeur contenue dans le réservoir d'exercer sa pression sur les deux faces du petit piston, qui se trouve ainsi en équilibre ; ces orifices sont trop petits pour avoir une influence sur la marche normale.

On passe du fonctionnement ordinaire au mode compound, en mettant le changement de marche à la position intermédiaire ; le robinet et la vapeur vive n'est plus admise directement au réservoir intermédiaire, qui est alimenté par la vapeur d'échappement du petit cylindre.

131. Système Urquhart. — M. Urquhart, ingénieur en chef du chemin de fer du *Sud-Est* russe (Griazi Tsaritzin), a appliqué à un grand nombre de locomotives de ce réseau, transformées en compound à deux cylindres, une valve de démarrage non automatique et très simple. Cette valve, placée sur le réservoir intermédiaire, est manœuvrée à la main par le mécanicien ; elle permet d'admettre directement la vapeur de la chaudière dans le grand cylindre au moment du démarrage.

Les locomotives à voyageurs à deux essieux accouplés sur l'avant que M. Urquhart a également transformées en locomotives compound à deux cylindres ont reçu, outre une valve de démarrage, une soupape interceptrice permettant de prolonger le fonctionnement en simple expansion pendant un certain temps après le démarrage. La figure 284 montre la disposition générale des appareils. Le mécanicien obtient le fonctionnement non compound pendant un temps indéterminé en fermant à la main la valve d'interception E et en ouvrant la valve de démarrage et la valve G qui vient occuper la position indiquée en pointillé sur la figure.

La valve G sert également de soupape de rentrée d'air pour éviter dans la descente des pentes et pendant la marche à régulateur fermé la résistance due à la grande surface du piston du cylindre de détente qui produit un vide assez

énergique dans le réservoir. Les leviers qui permettent de manœuvrer les valves E et G, aboutissent dans l'abri du mécanicien. Quand le démarrage est obtenu, le mécanicien passe du fonctionnement ordinaire à la marche en compound en fermant à la main la valve G et en ouvrant la valve d'interception E qui d'ailleurs peut s'ouvrir d'elle-même sous l'action de la vapeur d'échappement et du petit cylindre. La valve G s'ouvre automatiquement vers l'intérieur dès que l'on ferme le régulateur et permet ainsi aux deux pistons d'aspirer l'air extérieur par le tuyau D. Pour empêcher l'air froid d'abaisser la température du réservoir intermédiaire on introduit dans les cylindres un mélange formé d'une partie des gaz chauds de la boîte à fumée et d'air froid : les locomotives étant chauffées au pétrole, la boîte à fumée ne contient ni cendres, ni escarbilles et l'on n'a à craindre aucune détérioration des cylindres ni des tiroirs.

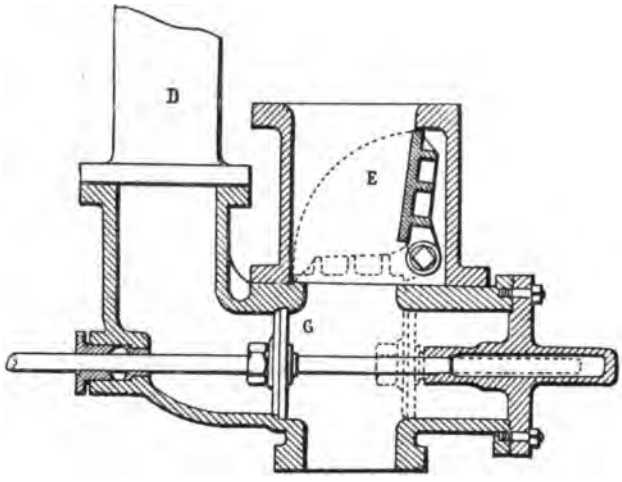


Fig. 284. — Valve de démarrage, système *Urquhart*.

On a réalisé ce perfectionnement en plaçant sur le tuyau vertical D un petit tube perforé qui puise les gaz dans la boîte à fumée : la surface des perforations est double de celle du tuyau. Le clapet du tuyau D est percé de deux trous dont le diamètre est déterminé de telle sorte que l'air et les gaz se trouvent mélangés dans la proportion de 1 à 4 environ.

Le clapet H est constitué par un ressort qui permet son ouverture automatique au moment du démarrage. Dans ces machines, les tiroirs des cylindres à basse pression sont équilibrés et la manivelle du cylindre à haute pression précède celle du grand cylindre dans la marche en avant.

132. Système Schichau. — M. Schichau, constructeur à Elbing (Prusse), a fait breveter une valve de démarrage automatique, dans laquelle l'ouverture du régulateur laisse pénétrer la vapeur de la chaudière qui soulève en même temps que la valve un piston, un régulateur de démarrage et un piston auxiliaire. Grâce à ce mouvement, le tiroir ferme la communication entre le réservoir et le grand cylindre, dont la boîte à vapeur reçoit de la vapeur à haute pression par un conduit spécial. Le rapport des surfaces de la valve et du piston est tel que la vapeur abaisse automatiquement ce dernier, qui glisse sur sa tige, dès qu'elle a atteint, dans la boîte à tiroir du grand cylindre,

une pression d'environ trois atmosphères ; l'admission de la vapeur à haute pression au grand cylindre est alors fermée, et le tiroir ferme toujours le réservoir intermédiaire, qui n'est ouvert que lorsque la pression y atteint une valeur suffisante pour abaisser ce tiroir en agissant sur le piston auxiliaire, avec lequel le réservoir communique librement.

133. Locomotive compound à deux cylindres de la Compagnie de l'Est. — La Compagnie de l'*Est* a fait construire en 1893, d'après les plans de M. Ed. Sauvage, deux locomotives compound à six roues accouplées destinées au service des trains de marchandises rapides. Ces machines sont mentionnées Chapitre II.

Nous avons dit plus haut que la principale difficulté rencontrée dans la construction des locomotives compound à deux cylindres consistait surtout dans l'installation d'un cylindre unique de détente, d'un diamètre pouvant dépasser 0,80 m. et qui, placé à l'extérieur, s'inscrit mal dans le gabarit. Quand les châssis sont intérieurs aux roues, on ne peut placer les deux cylindres entre les longerons dont l'écartement intérieur est suffisant. Il en est tout autrement si l'on place les longerons à l'extérieur des roues, leur écartement intérieur étant suffisant pour permettre l'installation du grand cylindre. C'est ce qui a été fait pour la machine de l'*Est* à laquelle on a pu donner des cylindres ayant respectivement 0,530 m. et 0,850 m. de diamètre, avec une course de 0,650 m.

Cette locomotive est à trois essieux accouplés, placés, deux d'entre eux sous le corps cylindrique, l'autre sous le foyer.

Les boîtes à tiroir sont placées sur le côté et inclinées ; l'échappement du petit cylindre se rend dans la boîte à tiroir du grand cylindre au moyen d'un tuyau qui contourne la boîte à fumée après avoir traversé une capacité qui renferme l'appareil spécial de démarrage. Une soupape de sûreté limite la pression dans ce tuyau formant réservoir à 5 kg. par centimètre carré. L'échappement se fait normalement par le grand cylindre seul. Un échappement dérivé vient du petit cylindre, et ne doit fonctionner qu'au démarrage.

L'appareil de démarrage comprend trois organes distincts, une soupape d'admission directe de vapeur dans le réservoir, un clapet d'isolement du petit cylindre et du réservoir, une soupape ouvrant une issue extérieure à l'échappement du petit cylindre. La soupape d'admission directe prend la vapeur dans la boîte à tiroir et non directement sur la chaudière afin d'éviter tout départ intempestif de la machine au cas où cette soupape resterait ouverte pendant les stationnements.

Pour le démarrage, l'admission directe de vapeur au réservoir est ouverte ainsi que l'échappement direct du petit cylindre, et le clapet de séparation est fermé. Pour passer à la marche en compound, le mécanisme unique de com-

mande commence par fermer la soupape d'admission directe, puis la soupape d'échappement direct et ouvre enfin le clapet de séparation.

Cette machine est étudiée en vue de fonctionner normalement avec un coefficient d'admission dans les deux cylindres variant de 45 à 50 0/0 et l'on fait surtout varier la puissance de la machine avec le régulateur.

134. Système Gölsdorf. — Cet appareil de démarrage, automatique, qui se rapproche du dispositif Lindner, a été appliqué à un certain nombre de machines compound à deux cylindres construites par l'administration des chemins de fer de l'*Etat autrichien* (machines express à quatre essieux accouplés et à bogie, et machines à marchandises à trois essieux accouplés) (fig. 285 et 286).

Au moment où le mécanicien ouvre le régulateur, la vapeur, amenée par les tuyaux D et E, est admise dans la boîte à tiroir du petit cylindre, en même temps qu'une certaine quantité de vapeur vive est intro-

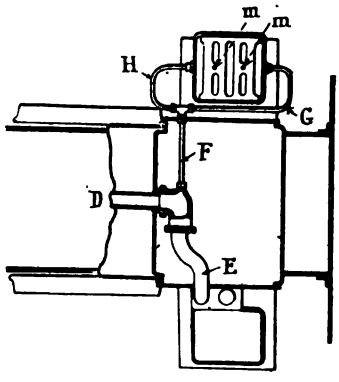


Fig. 285. — Disposition d'ensemble du système *Gölsdorf*.

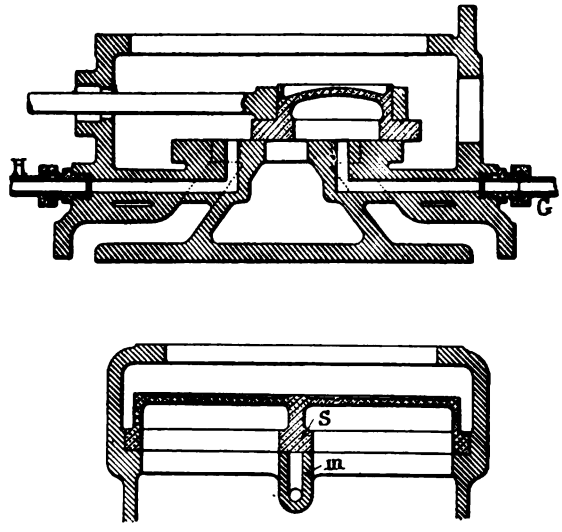


Fig. 286. — Coupes du tiroir à basse pression des locomotives compound, système *Gölsdorf*.

duite au-dessus de la table du tiroir du grand cylindre ; cette vapeur est dérivée du tuyau de prise de vapeur au moyen du petit tuyau F, qui se bifurque en G et en H, pour aboutir aux ouvertures circulaires *m*. Les dimensions des tuyaux et des ouvertures *m*, pratiquées dans la table du tiroir du grand cylindre, sont telles que la pression de la vapeur qui pénètre dans la boîte à tiroir atteigne rapidement la pression de 5,5 kg., qui est celle du réservoir intermédiaire. Les bandes S du tiroir recouvrent les lumières *m*, qui ne se découvrent que lorsque l'admission dépasse 55 0/0.

La machine fonctionnera donc en compound tant que l'admission restera inférieure à 55 0/0, puisque la vapeur vive ne pourra pénétrer dans la boîte du grand cylindre.

Pour démarrer, le mécanicien devra mettre son changement de marche à fond de course : le tiroir du grand cylindre découvrant alors les lumières *m*, la vapeur vive venant de la chaudière pénétrera à la fois dans le grand cylindre, où elle exercera un effort moteur, et dans le petit cylindre (par le réservoir intermédiaire) où elle produira une contre-pression. L'effort résistant produit dans le cylindre à haute pression au moment du démarrage est, sinon annulé complètement, du moins atténué dans de fortes proportions, parce que l'admission pouvant atteindre 90 0/0 au moins, quand le changement de marche est à fond de course, les deux manivelles motrices se

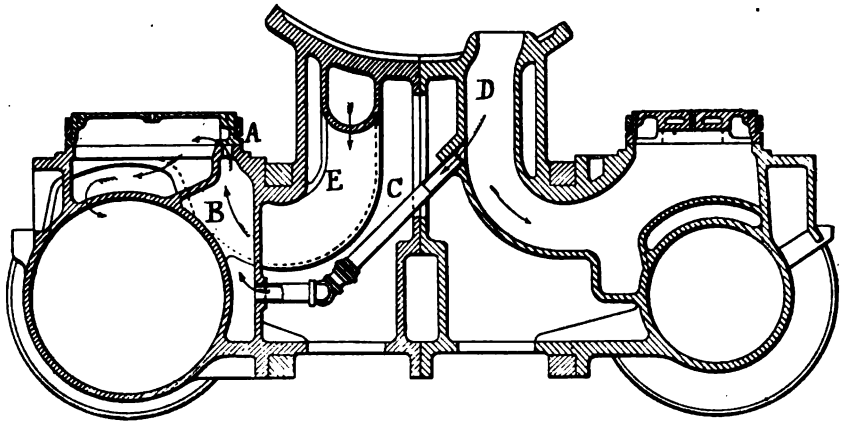


Fig. 287. — Système Gölsdorf appliqué sur le *Pensylvania Railroad.*
Coupe transversale du cylindre.

trouveront, au moment du démarrage, dans la position pour laquelle la différence entre l'effort moteur produit dans le grand cylindre et l'effort résistant produit dans le petit cylindre est minimum.

Pour empêcher la production de contre-pressions exagérées dans le cylindre à haute pression, on a percé dans le bord intérieur du tiroir une petite ouverture par où la vapeur peut s'échapper pendant la période de compression ; on a, de plus, porté le volume des espaces neutres à 12 0/0 du volume du cylindre. La marche à fond de course ne peut, malgré tout, avoir lieu que pendant un laps de temps très court, ce qui tend à assimiler le dispositif Gölsdorf aux appareils automatiques.

Notons que l'obligation de marcher, en temps normal, avec une admission inférieure à 55 0/0 peut offrir de nombreux inconvénients sur des lignes accidentées, parcourues par des trains express, et sur lesquelles les mécaniciens doivent être à même de regagner du temps.

Le *Pensylvania Railroad* a fait l'application du système Gölsdorf à des machines Mogul, du même type que celle qui a reçu l'appareil Von Borries. On trouvera figure 287 en coupe transversale, la disposition des cylindres et

conduits. Le principe est le même que plus haut. Il est seulement appliqué d'une manière un peu différente. Les ouvertures A pratiquées dans la table du tiroir à basse pression communiquent avec une cavité B, venue de fonte avec le cylindre et reliée par le tuyau C avec le tuyau d'admission de vapeur à la boîte du tiroir à haute pression. Le fonctionnement a lieu comme plus haut, la vapeur vive ne pouvant plus pénétrer dans la boîte à tiroir du grand cylindre, dès que les coulisses sont relevées, les ouvertures A n'étant plus découvertes par les barrettes du tiroir.

135. Système de Maffei. — Le constructeur Maffei, de Munich, a appliqué à plusieurs machines, entre autres pour l'*Etat bavarois*, un type de valve de démarrage automatique. La vapeur pénètre par le tuyau d'admission dans le cylindre à haute pression et à travers une soupape auxiliaire. Quand le levier de manœuvre est dans sa position moyenne, la soupape est pressée sur son siège à la fois par la vapeur et par un ressort à boudin.

Ce n'est qu'au moment du démarrage, c'est-à-dire pour les positions extrêmes du changement de marche, que la soupape auxiliaire est ouverte : la communication entre le réservoir auxiliaire et le tuyau d'échappement du petit cylindre est alors interceptée et ce dernier se trouve en relation directe avec le tuyau d'échappement. Pour les positions extrêmes du changement de marche on peut donc envoyer de la vapeur vive dans le cylindre à basse pression, tandis que le cylindre à haute pression échappe à l'air libre. Quand le mécanicien ramène son changement de marche vers sa position moyenne, le tiroir spécial est amené par le ressort dans une position telle que le tuyau d'échappement communique avec le réservoir et non plus avec le tuyau d'échappement et la soupape se referme. Le fonctionnement de cette soupape est automatique.

136. Système Pitkin des Schenectady. Locomotive Works. — M. Pitkin, ingénieur en chef des *Schenectady Locomotive Works*, a fait breveter, en 1891, un dispositif de mécanisme compound à deux cylindres différant sensiblement du système pour lequel il avait pris un premier brevet en 1889.

La figure 288 représente la valve d'interception en coupe, dans la position de fonctionnement en compound et en simple expansion.

Dans le fonctionnement en compound, la valve interceptrice est ouverte et l'admission directe de vapeur au grand cylindre est supprimée. Au moment du démarrage, le mécanicien ouvre le régulateur, et la vapeur de la chaudière est dirigée à travers le tuyau L et la lumière *l* vers la chambre M, dans laquelle elle rencontre la soupape *m*, qu'elle pousse vers la droite pour ouvrir la lumière *j* et pénétrer dans la chambre K, entre les pistons K, et K_1. La pression de la vapeur, pousse vers la droite le piston de

droite *K*, dont le diamètre est plus grand que celui du piston de gauche. Ce piston *K* passe donc de la position 1 à la position 2, et entraîne, en se déplaçant, le tiroir, ce qui découvre la lumière d'admission de gauche du cylindre I ; la vapeur de la chaudière pousse alors vers la droite le piston II, et ferme la valve interceptrice. Les dimensions relatives des divers organes sont telles que, lors de la fermeture de la valve interceptrice, le levier coudé O soulève la soupape équilibrée N_1, au moyen du doigt O_2 de la tige N_2 ; l'ouverture de la soupape N_1 permet à la vapeur vive de passer du tuyau L à travers le conduit *n*, dans le cylindre de la valve interceptrice, et, de là, dans le cylindre à basse pression par la lumière *e*. La valve interceptrice étant déjà fermée, la vapeur vive tend à l'appliquer sur son siège ; la communication avec le réservoir est ainsi coupée, ce qui empêche toute contre-pression derrière le cylindre à haute pression. Des ouvertures *g* sont pratiquées dans la soupape interceptrice, pour éviter qu'elle soit entraînée par des différences de pression s'exerçant sur l'une ou l'autre de ses faces : le fonctionnement de cet organe est donc assuré, quelle que soit la pression de la vapeur. Le recouvrement de la valve interceptrice doit être suffisant pour que la soupape N ne puisse s'ouvrir avant la fermeture complète de la valve interceptrice.

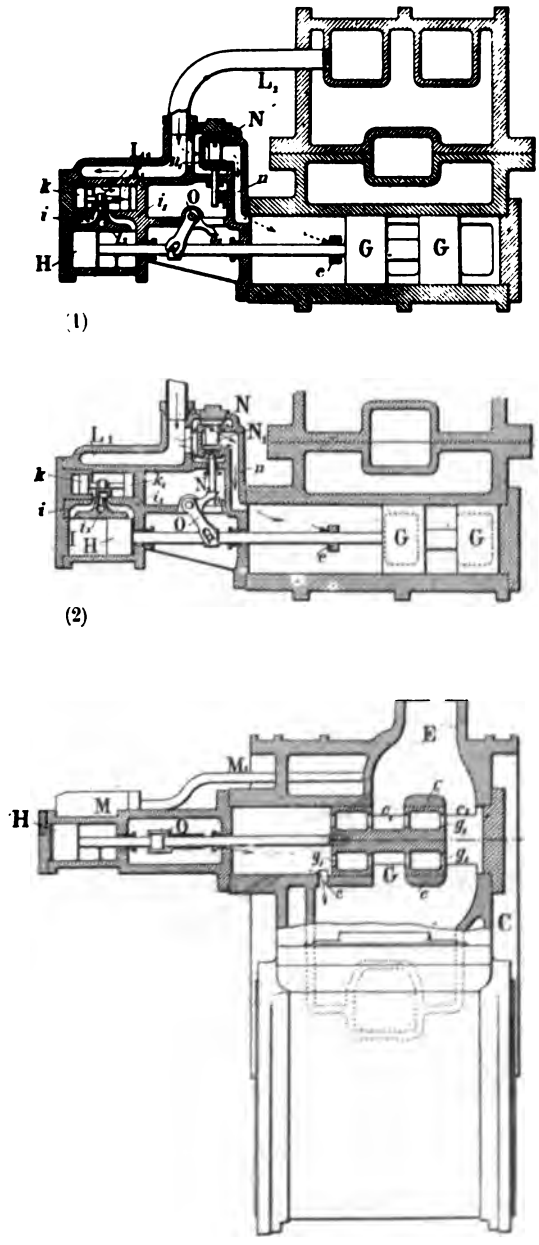


Fig. 288. — Valve de démarrage du système *Pilkin*. (1). Fonctionnement en compound. — (2). Fonctionnement ordinaire.

Pour passer du fonctionnement en simple expansion au fonctionnement en compound, il suffit de couper l'admission de la vapeur au cylindre à basse pression. Cette interception s'opère automatiquement, car la pression augmente rapidement à l'intérieur du réservoir et du tuyau E, qui communiquent avec la chambre auxiliaire M par le tuyau de retour M_2; la soupape m est repoussée sur son siège et ferme les lumières l et j, en ouvrant la lumière j_1. La vapeur est alors admise à travers la lumière j_1 et l'orifice j_2 sur la face extérieure du grand piston K_1 qui est entraîné vers la gauche ainsi que le tiroir ; l'échappement i_2 et l'orifice d'admission i_1, dans le cylindre I, étant alors ouverts, le piston H est repoussé vers la gauche et ouvre la valve interceptrice dont il est solidaire ; en même temps, le mouvement du piston H éloigne le doigt O_2 de la tige N_2 de la soupape, qui se ferme brusquement, avant que la valve interceptrice soit ouverte. Tous les organes ont ainsi repris d'eux-mêmes la position qu'ils occupaient au début et le fonctionnement compound se trouve rétabli automatiquement.

La valve interceptrice s'ouvre automatiquement chaque fois que la pression, dans le réservoir, est assez élevée pour contre-balancer celle de la soupape régulatrice auxiliaire. Elle s'ouvrira même si le régulateur est fermé, à la descente d'une pente par exemple, à condition que le petit cylindre laisse échapper, pendant les cylindrées qui suivent la fermeture, un volume de vapeur suffisant pour élever, dans le réservoir, la pression de la quantité voulue.

137. Système Batchellor. — M. Clifford H. Batchellor, ingénieur des *Rhode Island Locomotive Works*, à Providence (Etats-Unis), a fait breveter, en 1891, un dispositif de mécanisme compound à deux cylindres, avec valve de démarrage automatique. La figure 290 représente une coupe transversale de la boîte à fumée, montrant la disposition des tuyaux de vapeur et de la valve interceptrice, reproduite à plus grande échelle dans la figure 289 (positions correspondant à la marche en compound) et à la marche à simple expansion. Les figures représentent aussi la soupape d'échappement dans les positions correspondant respectivement à la marche en compound et à la marche en simple expansion. Quand le mécanicien ouvre le régulateur, la vapeur vive est amenée, par le tuyau G, à la boîte du tiroir à haute pression, et, par le tuyau D, dans la boîte de la soupape interceptrice A, qui se compose d'une enveloppe dans laquelle peuvent se mouvoir trois pistons de diamètre différent a, b, c, montés sur une tige unique horizontale, et dont les déplacements trop brusques sont prévenus par un quatrième piston faisant office de frein, qui se meut dans un réservoir à huile C ; le piston de la valve interceptrice, qui occupait auparavant la position 1, la soupape d'échappement étant fermée, prend alors la position 2, et ferme la communication entre le grand cylindre et le réservoir intermédiaire E.

La vapeur, amenée par le tuyau D, traverse ensuite les lumières *d* et *c*, puis la valve de réduction H, et pénètre enfin dans la boîte du grand tiroir à une pression moindre que dans celle du petit tiroir. Cette réduction de pression s'opère dans la proportion des surfaces des pistons. L'échappement du grand cylindre s'effectue dans la culotte K. Le tiroir à trois pistons *a*, *b*, *c* est disposé de telle façon qu'il revienne automatiquement dans la position correspondant au fonctionnement en compound au bout de quelques coups de piston, c'est-à-dire dès que la pression de la vapeur provenant de l'échappement du petit cylindre a atteint, dans le réservoir intermédiaire, une valeur suffisante pour repousser le piston *c*, qui ouvre la communication entre le réservoir intermédiaire et le grand cylindre ; en même temps, le piston *b* interrompt l'accès de la vapeur de la chaudière dans le grand cylindre, en fermant les lumières *d* et *e* : la machine fonctionne dès lors en compound.

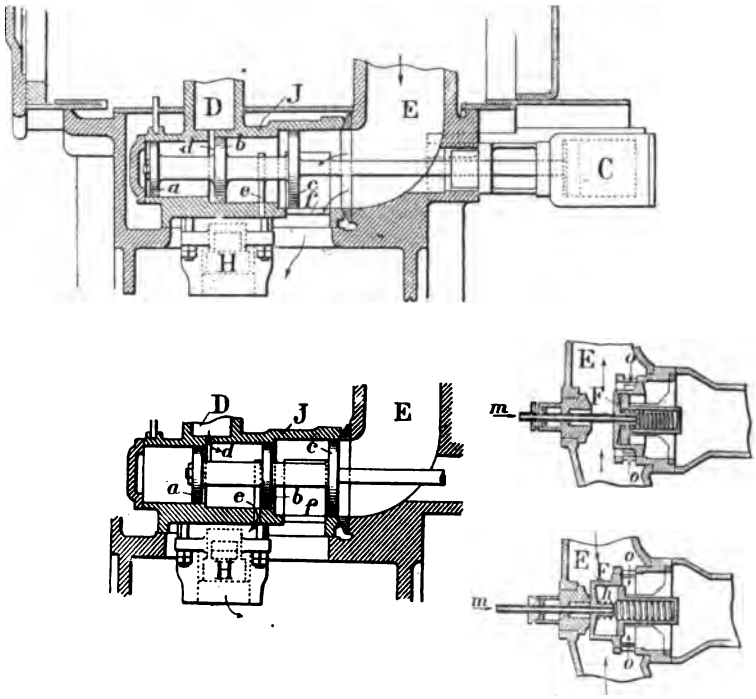


Fig. 289. — Valve de démarrage, système *Batchellor*.

En un mot, la valve de démarrage est automatique puisque le fonctionnement, qui a lieu en simple expansion pendant quelques tours de roue, au moment du démarrage, redevient compound dès que la pression a atteint une valeur suffisante au réservoir intermédiaire.

Toutefois, le mécanicien peut modifier le fonctionnement automatique de la valve de démarrage si des circonstances exceptionnelles exigent un effort de traction considérable ; il ouvre à cet effet la soupape F, qui établit une communication entre le réservoir intermédiaire et l'échappement, et permet à la vapeur sortant du petit cylindre de s'échapper directement dans l'atmosphère. La soupape F est manœuvrée à distance par le mécanicien au moyen d'un robinet à trois voies, permettant d'admettre la vapeur de la chaudière dans un petit tuyau *m* réunissant les deux soupapes. Pour déter-

miner le fonctionnement compound, le mécanicien laisse ouvert le robinet à trois voies et met ainsi l'intérieur du tuyau *m* en communication avec l'air extérieur : la pression du réservoir suffit pour maintenir la soupape d'échappement F dans la position de fermeture pour marcher à simple expansion, le mécanicien envoie de la vapeur vive dans le tuyau *m*, la soupape F s'ouvre alors, et le réservoir est mis en communication avec l'échappement par les lumières *o*, percées à travers l'enveloppe de la soupape F.

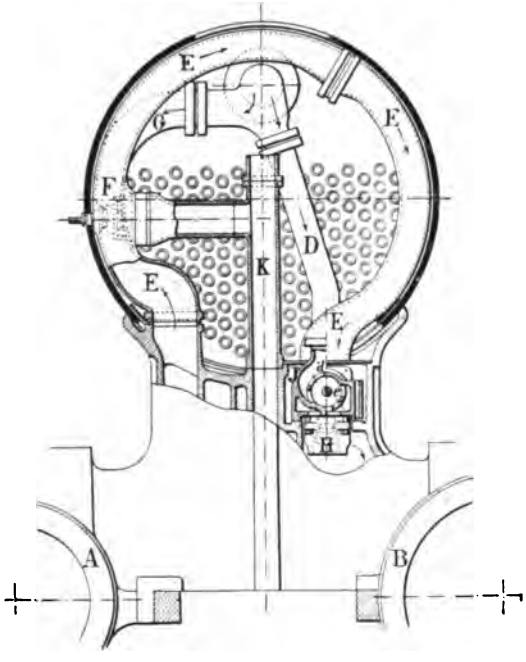


Fig. 290. — Système *Batchellor*, disposition d'ensemble.

138. Système Colvin, des Pittsburgh Locomotive Works. — Les *Pittsburgh Locomotive Works* (Etats-Unis) ont appliqué à un certain nombre de machines un dispositif, breveté en 1890 par M. H.-F. Colvin de Philadelphie, qui l'a quelque peu modifié dans la suite. Dans la disposition actuelle, la patte d'attache du cylindre à haute pression renferme un tiroir cylindrique jouant le rôle de valve interceptrice, et qui est représenté dans ses deux positions (fig. 291).

Quand on ouvre le régulateur, le levier de changement de marche étant à fond de course, la vapeur vive, amenée par les tuyaux, pénètre dans la boîte à vapeur du petit cylindre et dans le canal, qui aboutit à une soupape réductrice à piston différentiel D ; le piston D ayant un diamètre supérieur à celui du piston D_1, la soupape D est entraînée vers la droite, et la vapeur se rend au cylindre de détente B, en traversant le canal *g* et le réservoir intermédiaire *h ;* la vapeur d'échappement du petit cylindre est introduite, par le canal *e*, entre les deux pistons de la soupape d'échappement C, d'où elle passe, en traversant le canal *f*, dans la culotte d'échappement qui reçoit également la vapeur sortant du grand cylindre. La machine fonctionne donc, pendant cette première période, comme une machine à simple expansion, avec échappement direct de la vapeur pour les deux cylindres.

Quand le démarrage est opéré, le mécanicien met la valve interceptrice D dans la position qui correspond au fonctionnement en compound ; il suffit pour cela de relever de quelques crans le levier de changement de marche :

cette manœuvre a pour effet d'admettre la vapeur derrière le piston d'un petit cylindre auxiliaire, placé à l'intérieur de l'abri, qui commande la valve interceptrice C, par l'intermédiaire d'un balancier et d'une tige E ; la valve C est amenée instantanément dans la position 2 ; le passage qui mène de la soupape de réduction au réservoir intermédiaire est fermé, et la vapeur d'échappement du petit cylindre est dirigée vers le réservoir, d'où elle passe dans la boîte à tiroir du cylindre de détente : le fonctionnement en compound est dès lors établi, puisque la vapeur n'est plus admise directement que dans le petit cylindre. La valve revient automatiquement à la position correspondant au fonctionnement à simple expansion quand le mécanicien remet le levier de changement de marche à fond de course, soit pour démarrer, soit pour augmenter momentanément l'effort de traction en cours de route, sur une section difficile.

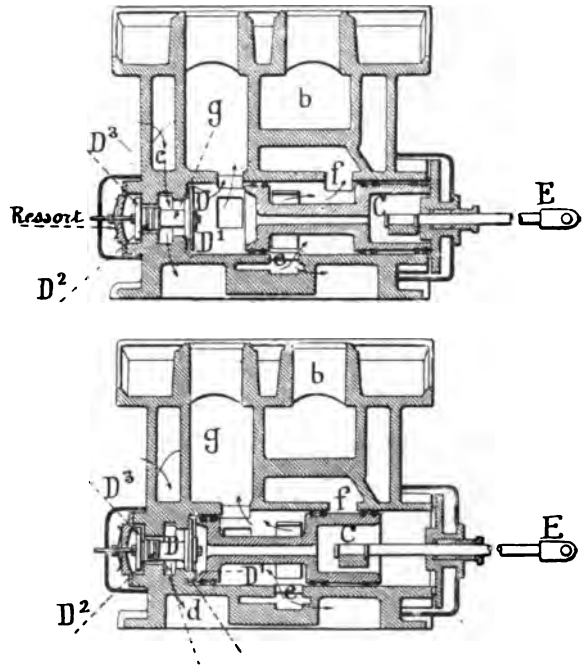


Fig. 291. — Valve de démarrage, système *Colvin*.

139. Système des Richmond Locomotive Works. — Nous prendrons, comme exemple de ce système, le dispositif appliqué récemment à une locomotive Mogul du *Pensylvania Railroad* (fig. 292).

Pour la marche ordinaire, on ouvre le régulateur et on place le levier de changement de marche dans une de ses positions extrêmes. Pendant cette manœuvre, un des deux taquets PP′ fixés sur la barre de relevage vient en prise avec le levier de la soupape L, qui admet l'air comprimé ou la vapeur, par un tuyau, à la chambre F. L'air ou la vapeur agissant sur le piston P, relié à la soupape E, fait mouvoir cette soupape, et la communication s'établit entre les chambres M et Q. Or, comme M communique avec l'atmosphère, la vapeur contenue dans M et dans Q peut s'échapper, et la pression diminue dans la chambre Q, derrière le piston B, qui est relié à la valve interceptrice A. En même temps, la vapeur, qui pénètre à travers le canal N, soulève la soupape d'admission et de réduction D, ce qui permet à la vapeur de pénétrer dans l'espace R, qui conduit au réservoir intermédiaire et au cylindre à basse pression; la valve interceptrice se ferme alors, et la soupape B quitte son siège.

La vapeur d'échappement est alors évacuée directement dans les chambres Q et M et, de là, à l'air libre par le tuyau d'échappement O du cylindre à haute pression ; en même temps, le cylindre à basse pression reçoit de la vapeur vive, qui pénètre dans le réservoir intermédiaire par le tuyau N.

Pour passer du fonctionnement ordinaire au mode compound, le régulateur étant ouvert, on ramène le changement de marche de sa position extrême vers une position intermédiaire ; le taquet P ou P' cesse alors d'être en prise

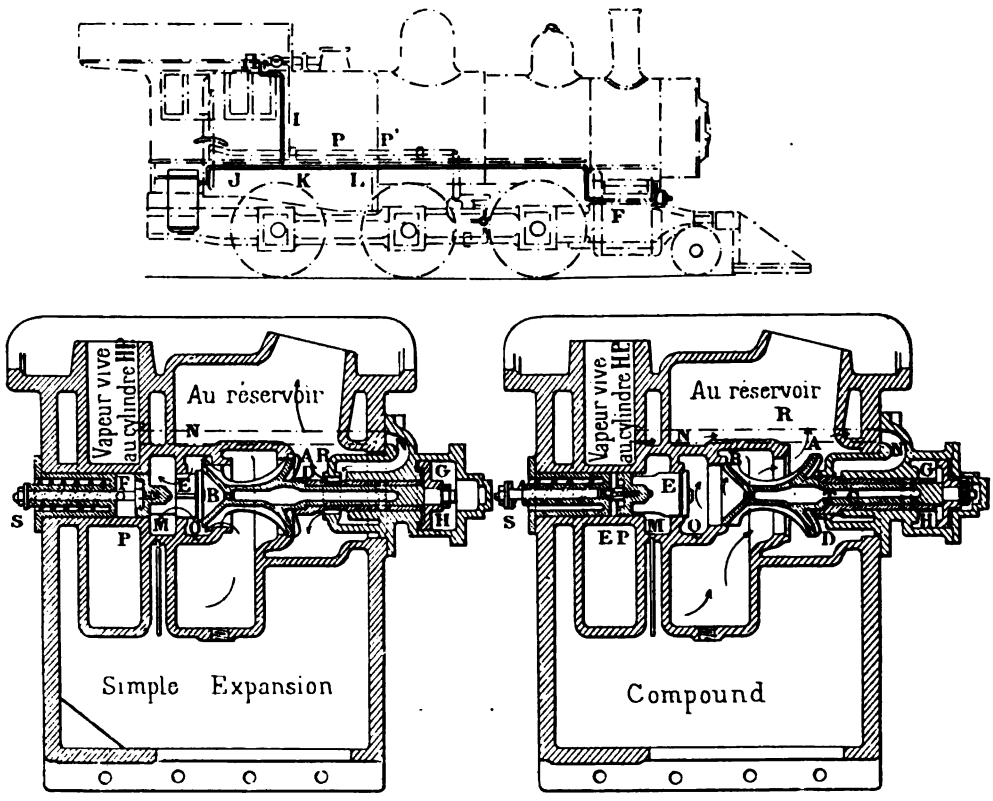


Fig. 292. — Valve de démarrage, du système Richmond (*Pensylvania Railroad*).

avec le levier de la soupape L, et la vapeur ou l'air cesse d'accéder à la chambre F ; la soupape E se ferme alors sous l'action du ressort à boudin S. En même temps, la vapeur d'échappement du cylindre à haute pression s'accumule dans la chambre O, et sa pression excède bientôt celle qui s'exerce du côté opposé de la soupape interception A, qui est soulevée de son siège ; la soupape D se ferme alors, et l'admission de vapeur vive au cylindre à basse pression par le canal N est interrompue, tandis que la communication s'établit, entre le tuyau d'échappement du cylindre à haute pression et le grand cylindre, à travers le canal O, la chambre R et le réservoir intermédiaire.

Le régime compound est dès lors établi.

Le fourreau de la soupape D peut se déplacer suivant la tige C de la soupape interceptrice, et, étant donnée la différence des surfaces de l'extrémité du fourreau et de l'épaulement T, le premier agit comme soupape d'admission et de réduction de pression du grand cylindre, au moment du démarrage.

La soupape B a pour objet d'assurer la fermeture rapide de la soupape A quand la soupape E est ouverte.

140. Système Player des Brooks Locomotive Works. — Ce dispositif est entièrement automatique, le mécanicien ne pouvant exercer aucune action sur le fonctionnement de la machine, ni au démarrage ni en cours de route ; le passage du fonctionnement ordinaire au mode compound s'opère après que la vapeur d'échappement du petit cylindre, accumulée dans le réservoir intermédiaire, y atteint une pression suffisante pour agir sur le mécanisme automatique.

Un conduit fait communiquer le tuyau de prise de vapeur avec la partie arrière de la valve interceptrice dont la soupape est appliquée sur son siège par la pression de la vapeur. La valve est fermée par un piston annulaire qui se meut à l'extérieur d'un double piston. Quand celui-ci se meut vers l'avant, la vapeur le traverse et pénètre dans le réservoir ; dès que la vapeur, accumulée dans le réservoir, a atteint une certaine pression, le double piston est ramené dans sa position primitive et le grand cylindre cesse de recevoir directement la vapeur de la chaudière. Ce piston auxiliaire fonctionne en même temps comme soupape réductrice grâce à la différence de diamètre de ses deux faces. Le mécanicien peut également se servir, dans ce but, de deux clapets fixées sur le réservoir intermédiaire qu'il ouvre et ferme au moyen d'un levier ; ces soupapes placées, l'une du côté du petit cylindre, l'autre du côté du grand, servent à faciliter le démarrage et l'arrêt rapide de la machine au cours des manœuvres à l'intérieur des dépôts. En ouvrant celle du petit cylindre on peut marcher en simple expansion avec ce cylindre seul mais dans des limites restreintes, car l'échappement de la vapeur a lieu par un orifice de section très faible.

141. Système des Rogers Locomotive Works. — Mr R. Wells, ingénieur des *Rogers Locomotive Works* à Paterson (États-Unis), a imaginé un système de valve entièrement automatique. La figure 293 représente une coupe longitudinale de la boîte à fumée d'une locomotive munie de ce dispositif. La valve interceptrice consiste en une soupape B et en un piston A montés sur une tige F dans une boîte J ; l'espace compris entre la soupape et le piston est rempli de vapeur vive amenée par un tuyau de 60 millimètres de diamètre. La valve présente à sa partie supérieure une surface environ double de celle

du piston; la chambre Q, qui se trouve au-dessus du piston A, communique avec l'atmosphère par l'orifice X afin que le fonctionnement ne puisse être paralysé par les fuites. Quand la pression entre la soupape et le piston est inférieure de moitié à celle de la vapeur vive dans la chambre J, la vapeur est admise dans le réservoir. La position de la soupape réductrice est réglée par celle du levier de changement de marche et la soupape ne peut être ouverte que si le changement de marche est à fond de course en avant ou en arrière. La partie supérieure de la tige F de la soupape réductrice est percée d'une ouverture que traverse en G l'extrémité d'un petit levier monté sur un arbre et actionné par un bras H, placé à l'extrémité de la boîte à fumée et articulé à une tringle qui vient se fixer sur le levier de changement de marche, mais avec l'interposition d'une petite coulisse recourbée disposée de telle sorte que quand le levier de manœuvre est dans une de ses positions médianes, le bras G exerce sur la tige F de la soupape réductrice une pression assez forte pour empêcher son soulèvement,

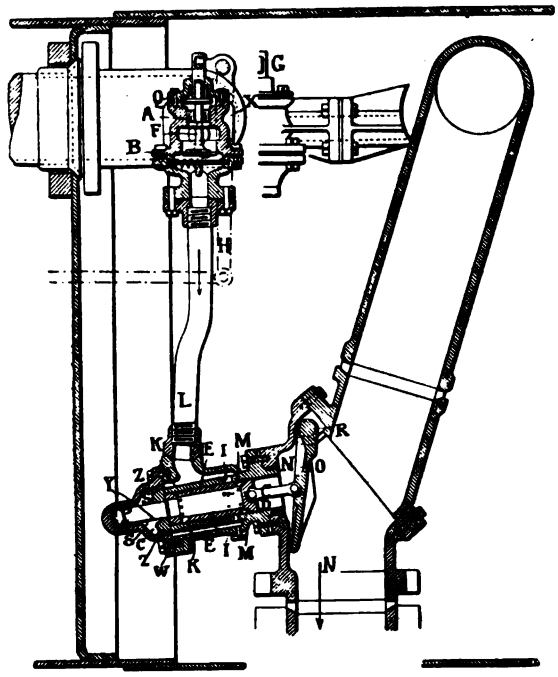


Fig. 293. — Valve de démarrage, système *Rogers*.

La vapeur, après avoir traversé la valve de réduction, se rend par le petit tuyau à la valve interceptrice qui se compose d'un clapet O pouvant fermer le tuyau du réservoir de manière à empêcher la contre-pression de s'établir devant le petit piston. Ce clapet est relié par une menotte O à un piston creux T qui se meut à frottement très doux à l'intérieur d'une chambre annulaire E en communication avec le tuyau L; des trous de 15 millimètres sont percés en I à travers les parois des cylindres. Un nombre égal de trous d'un diamètre un peu plus faible, sont percés en K dans le piston; quand ces trous correspondent, la vapeur venant de E peut passer à l'intérieur de ce piston. Les trous de même diamètre M percés à l'autre extrémité du piston permettent, lorsque la soupape interceptrice est fermée et que le piston dépasse l'entrée du cylindre, l'entrée de la vapeur dans l'espace G et de là à la boîte du grand tiroir.

La partie arrière du cylindre comporte une chambre S autour du plongeur P qui continue le piston T. Deux trous ZZ de très petit diamètre permettent à la vapeur d'agir sur le plongeur P afin de fermer la soupape interceptrice O.

Quand les organes sont dans la postion de la figure, la vapeur est admise à travers le tuyau L dans la chambre annulaire E ; mais comme les trous I ne correspondent pas avec ceux de T, la vapeur ne peut passer qu'à travers les trous Z dans l'espace S ; elle agit alors sur le plongeur P en repoussant le système et elle referme la valve interceptrice. A ce moment les trous K se trouvent correspondre aux trous I et les ouvertures M sont en dehors du cylindre ; la vapeur vive pénètre alors dans la boîte à tiroir du grand cylindre. Les trous Z et le plongeur P ont une faible section afin d'éviter la fermeture trop brusque de la soupape interceptrice.

Quand la soupape réductrice B est fermée, afin de permettre au piston T de revenir dans la position (1) quand la pression devient égale sur les deux faces de la soupape interceptrice, on a ménagé des trous en C et en D, par lesquels la vapeur peut passer de N en T en S ou en L, ainsi que par les orifices Z.

LOCOMOTIVES COMPOUND A TROIS CYLINDRES

142. Système Webb. — Deux cylindres à haute pression, extérieurs, placés entre la première et la seconde paire de roues actionnent l'essieu arrière. L'essieu milieu est commandé par un cylindre unique, à basse pression, placé au centre et à l'avant. Ces deux essieux ne sont pas acccouplés, la suppression des bielles d'accouplement, dans les machines à grande vitesse, étant considérée, par M. Webb, comme un des principaux avantages de son système. Dans les machines construites antérieurement à 1890, la vapeur de la chaudière était amenée aux petits cylindres extérieurs par un tuyau passant dans la boîte à fumée puis elle se rendait à la boîte à tiroir du cylindre intérieur de détente par des tuyaux qui constituaient le réservoir intermédiaire, contournaient l'intérieur de la boîte à fumée et aboutissaient tous deux à chaque extrémité de la boîte à tiroir du grand cylindre ; on obtenait ainsi un réservoir intermédiaire d'une capacité suffisante.

Une soupape de sûreté, placée sur la boîte à tiroir du grand cylindre, est destinée à empêcher que la pression au réservoir en cas de patinage au départ ne dépasse 5 kg ; on évite ainsi que la vapeur accumulée dans le réservoir intermédiaire, atteigne une pression assez forte pour paralyser le fonctionnement des petits cylindres.

Les tiroirs étaient commandés par des distributions système Joy. Le

relevage des distributions à haute et basse pression était indépendant, le changement de marche des petits cylindres s'effectuant au moyen d'une manœuvre à vis permettant de varier la détente à volonté et celui du grand cylindre à l'aide d'un levier dont le secteur porte un cran unique pour la marche avant, auquel on place le levier au cas où la machine n'a que de faibles charges à remorquer. M. Webb a modifié cette disposition dans le type *Dreadnought* et a adopté un changement de marche à vis unique permettant de commander, ensemble ou isolément, les deux distributions à la volonté du mécanicien. Dans le type *Jeannie Deans*, M. Webb a introduit, entre autres, un certain nombre de modifications intéressant la tuyauterie et la distribution. On peut envoyer de la vapeur vive dans la boîte : tiroir du grand cylindre au moyen d'un régulateur auxiliaire (fig. 294). Le tiroir du grand cylindre est muni d'un compensateur ; l'échappement s'opère par le dos.

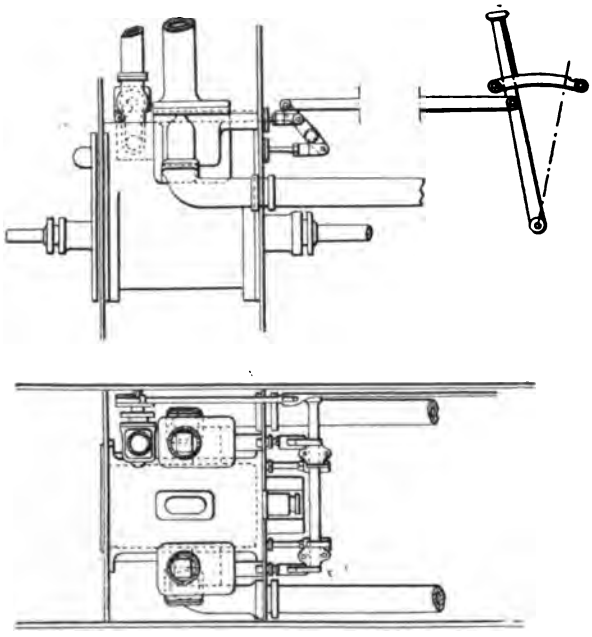


Fig. 294. — Système Webb. Ensemble du grand cylindre et de la tuyauterie.

M. Webb a également simplifié la distribution du grand cylindre pour lequel il avait employé à l'origine la distribution Joy déjà appliquée aux petits cylindres. Le tiroir à basse pression est actionné par un excentrique à toc ; au moment où l'on renverse la marche des cylindres à haute pression, le toc n'actionne l'excentrique qu'après avoir glissé de 90° dans une coulisse. La barre d'excentrique attaque le balancier de renvoi par un coulisseau qui permet de faire varier à volonté l'introduction au grand cylindre en agissant de la plate-forme sur une tringle spéciale.

Enfin le même ingénieur, en 1894, adapta son système aux locomotives à huit roues accouplées, type créé récemment pour le service des trains de houille du *London and North Western Ry*. La disposition générale est la même, mais les cylindres à haute pression ont été reportés à l'avant, par le travers du grand cylindre. Tous trois attaquent le même essieu (le second). Le tiroir du grand cylindre est actionné, comme dans le type *Jeannie Deans*, par un excentrique à toc ; les tiroirs à haute pression, placés entre les longerons, sont commandés directement par des coulisses de Stephenson inté-

rieures dont les excentriques sont calés de part et d'autre de la manivelle centrale du grand cylindre.

143. Locomotive compound à trois cylindres du chemin de fer du Gothard. — Cette machine, à trois essieux accouplés avec bogie à l'avant, a été étudiée en vue d'expériences comparatives avec les locomotives similaires à quatre cylindres que la *Compagnie du Gothard* a fait construire pour la traction de ses trains de voyageurs. La vapeur, à 15 km., pénètre d'abord dans un cylindre médian à haute pression et se détend dans deux cylindres ayant chacun un diamètre un peu plus grand. Des coulisses du système Walschaërt avec balanciers de renvoi pour les mécanismes intérieurs, commandent des tiroirs Trick.

Les appareils de relevage pour les deux mécanismes à haute et basse pression sont actionnés au moyen de deux vis de changement de marche, reliées par des engrenages, qui peuvent être manœuvrées simultanément par un volant unique ; des verrous permettent de faire fonctionner l'une des deux vis indépendamment de l'autre.

L'appareil de démarrage est disposé de manière à permettre de faire évacuer directement la vapeur d'échappement du groupe à haute pression au lieu de l'envoyer au réservoir intermédiaire dans lequel on fait pénétrer en même temps de la vapeur vive empruntée à la chaudière au moyen d'un petit régulateur spécial. Cet appareil de démarrage, dont les pistons sont actionnés par le jeu d'un robinet, permet d'obtenir quatre modes de fonctionnement distincts savoir :

1° Marche normale en compound.

2° Marche avec les cylindres à haute pression seuls avec échappement direct dans l'atmosphère.

3° Marche avec les cylindres à basse pression seuls. Le régulateur principal est fermé, le petit régulateur auxiliaire est ouvert, l'appareil de démarrage reste dans la même position que pour les cylindres à haute pression seuls.

4° Marche avec admission directe dans tous les cylindres, le régulateur principal étant seul ouvert.

144. Locomotive à trois cylindres du Chemin de fer du Nord. — La Compagnie du *Nord* a mis en service en 1887 une locomotive compound à trois cylindres (n° 3101) à six roues couplées avec essieu porteur radial à l'avant qui a été étudiée par M. E. Sauvage. Les trois cylindres placés transversalement sur la même ligne actionnent l'essieu accouplé du milieu ; le coude commandé par le cylindre intérieur à haute pression est orienté suivant la bissectrice de l'angle doit formé par les manivelles motrices qu'attaquent les cylindres extérieurs à basse pression.

Le diamètre du cylindre admetteur qui était primitivement de 0,460 m. a été ramené au diamètre des cylindres des locomotives ordinaires à grande vitesse (0,432 mm.) par l'application d'une chemise intérieure en fonte. Le réservoir intermédiaire est constitué par des chambres placées de part et d'autre du cylindre intérieur et faisant corps avec lui ; ces chambres communiquent par des tubulures avec les boîtes à vapeur des cylindres à basse pression.

La distribution des cylindres de détente est du système Walschaërt avec changement de marche ordinaire à vis et tiroirs Trick. Pour éviter la compression exagérée dans le cylindre à haute pression, ce qui aurait causé une perte de force et rendu difficile le fonctionnement du mécanisme à grande vitesse, on a modifié la distribution et agrandi les espaces morts. La distribution adoptée était d'un type spécial (*genre Meyer*) à deux tiroirs, sans coulisse ; le tiroir proprement dit, commandé par excentrique, présente une course invariable et ne peut donner seul qu'une admission constante. A chacune de ses extrémités sont ménagées deux lumières dont les bords, perpendiculaires à l'axe du cylindre sur la face en contact avec la table de celui-ci, présentant sur le dos du tiroir une inclinaison de 1/2 par rapport à la première direction. Un second tiroir mobile sur le dos du premier, et commandé par un excentrique spécial calé à 180° par rapport à la manivelle motrice sert à couper l'admission ; l'inclinaison de ses bords correspond à celle des lumières extérieures du tiroir principal. Pour faire varier l'admission, on déplace transversalement le tiroir auxiliaire ou taquet de distribution au moyen d'un mouvement de renvoi commandé par un levier mobile sur un secteur à crans.

Grâce à l'obliquité des lumières, le distributeur auxiliaire, au début de la course du piston, est d'autant plus proche du bord de l'orifice que le tiroir se trouve reporté davantage, vers la droite, ce qui correspond aux faibles admissions. La direction des lumières en deux parties dans le sens de la longueur permet de donner aux deux tiroirs des dimensions restreintes.

Le tiroir est monté dans deux cadres superposés : l'un, plus rapproché du cylindre, assure son déplacement longitudinal ; le second, placé en dessous, sert à opérer le déplacement transversal, il présente une longueur intérieure égale à la course. On peut faire varier à volonté l'importance de la compression grâce à l'obliquité des bords de la lumière d'échappement et du tiroir, l'étendue des recouvrements intérieurs se trouvant modifiée lorsqu'on déplace le tiroir transversalement pour changer le degré d'admission.

En poussant le tiroir dans sa position extrême vers la gauche on admet la vapeur dans le cylindre par les deux lumières d'admission et par l'orifice d'échappement qui se trouve constamment découvert. Le piston du cylindre à haute pression recevant à la fois la vapeur sur ses deux faces se trouve

annulé ; la vapeur de la chaudière se rend directement aux cylindres extérieurs et la locomotive fonctionne alors comme une machine à cylindres égaux à simple expansion. Cette locomotive ne peut fonctionner en compound pendant la marche en arrière, le tiroir devant être alors nécessairement placé dans la position transversale correspondant à l'admission directe aux cylindres extérieurs.

LOCOMOTIVES COMPOUND A QUATRE CYLINDRES

I

MACHINES A DEUX MANIVELLES

145. Locomotives compound (système Woolf) à quatre cylindres de la Compagnie du Nord. — M. l'Ingénieur en chef du Bousquet a étudié en 1887 la transformation, en machines compound à quatre cylindres disposés deux à deux en tandem, des locomotives à marchandises à huit roues accouplées de la Compagnie du Nord dans le but d'accroître leur puissance sans les modifier d'autre part, pour les mettre en rapport avec les nécessités du trafic sur les lignes transversales, à profil accidenté, mettant en relation les houillères du Pas-de-Calais avec les usines métallurgiques de la région de l'Est.

Chacun des cylindres des anciennes locomotives a été remplacé par deux cylindres inégaux en tandem, fondus d'une seule pièce et séparés par un fond commun. Pour diminuer le porte à faux et la longueur des longerons, on a placé le grand cylindre sur l'avant, de sorte que le petit, compris entre les deux tiges du piston à basse pression, peut se placer contre les roues directrices aussi en arrière que le permettent les bielles d'accouplement. Les trois tiges actionnent une même crosse (fig. 295). Le petit cylindre a un diamètre de 0,38 m., le grand a un diamètre de 0,65 m. ; la course commune est de 0,65 m., le rapport des volumes est égal à 3.

La distribution est opérée, dans chaque groupe, par un tiroir unique à canal intérieur qui se meut sur une table percée de cinq orifices. Les orifices extrêmes correspondent au petit cylindre, les deux orifices intermédiaires au grand cylindre. La lumière centrale sert à l'échappement. Le volume des espaces morts a été porté à 15 0/0 pour le cylindre à haute pression afin de réduire la compression, il est, pour le grand cylindre, de 7,5 à 8 0/0 du volume engendré. Quand on veut, dans les machines Woolf, opérer la distribution aux deux cylindres par le même tiroir, il est nécessaire de réduire au minimum le volume du réservoir intermédiaire, constitué, dans la machine

du *Nord*, par le canal pratiqué à l'intérieur du tiroir et établissant la communication entre les deux cylindres ; son volume est environ le dixième de celui du cylindre admetteur. Pour réduire le laminage, on a allongé les lumières du petit cylindre et ménagé, dans le tiroir, un second canal genre Trick. Le tiroir est équilibré par un piston compensateur du type Adams. Aucune modification n'a été apportée au mouvement de distribution ni au changement de marche.

Cette locomotive fonctionne habituellement en compound même pour le

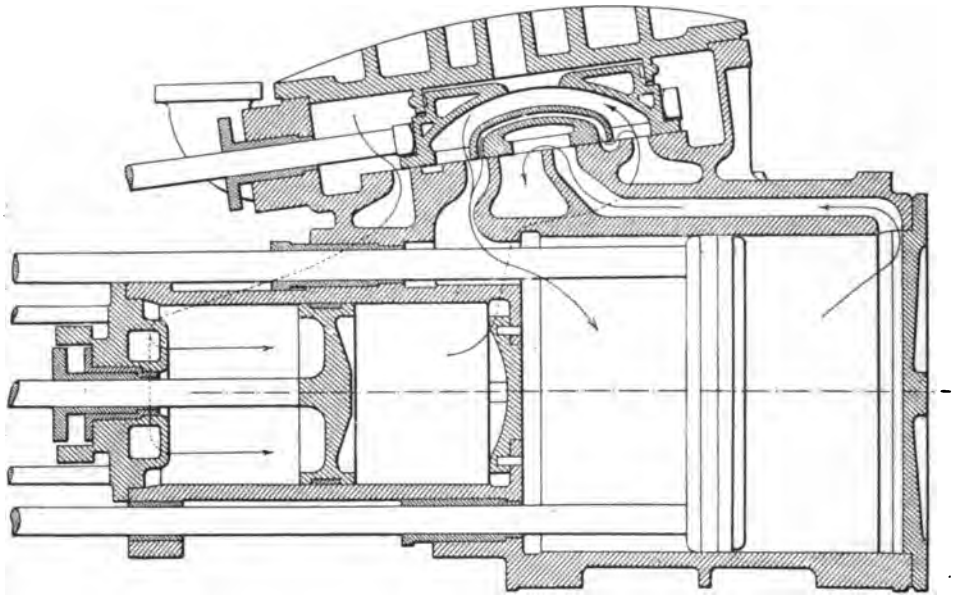


Fig. 295. — Disposition générale des cylindres HP et BP et de la boite à tiroir commune, des locomotives Woolf à marchandises du *Chemin de fer du Nord*.

démarrage bien qu'une prise de vapeur spéciale permette l'introduction directe au grand cylindre, ce qui donne un effort de traction considérable, les grands cylindres ayant un diamètre très supérieur à celui des locomotives non compound de la même classe. Des soupapes placées au centre du plateau de la boîte à vapeur permettent la rentrée de l'air dans le grand cylindre pour la marche à régulateur fermé ; leur fermeture est obtenue au moyen d'un petit piston sans segments sur lequel vient agir la vapeur au moment de l'ouverture du régulateur. A la descente des pentes l'écoulement, par le tuyère d'échappement, de l'air aspiré par les pistons produit un tirage assez énergique qui permet de supprimer l'emploi du souffleur. A la suite des essais des trois premières machines transformées, la Compagnie du *Nord* a commandé vingt machines du même type avec chaudières timbrées à 12 kg.

146. Locomotive à cylindres en tandem de l'Etat hongrois. — Cette machine a été construite en 1891, à peu près à la même époque que les locomotives à quatre cylindres 2121 et 2122 de la Compagnie du *Nord* décrites plus loin. Les cylindres sont extérieurs et situés deux à deux de part et d'autre (fig. 183). Les cylindres à basse pression sont montés dans le prolongement des petits cylindres avec lesquels ils sont venus de fonte. Cette disposition des quatre cylindres placés à l'avant sur la même ligne a entraîné une charge considérable du bogie qui porte 26,5 t. alors que le poids total de la machine est de 54,4 t. Comme les longerons sont extérieurs ainsi que les boîtes à tiroir, qui sont volumineuses et inclinées sur le côté, la largeur maximum de la machine atteint la cote de 3,15 m. qui ne serait pas possible avec la plupart des gabarits.

Les deux cylindres sont suffisamment écartés pour permettre, entre leurs fonds, l'installation des deux garnitures en laissant la place voulue pour le démontage de leurs chapeaux.

Les tiroirs des deux cylindres de chaque groupe sont actionnés par la même tige que commande une distribution Walschaërt. Le tiroir à basse pression porte, sur son dos, une platine qui empêche son soulèvement sous l'effet de la compression dans la marche à régulateur fermé.

Cette machine ne fonctionne pas suivant le système Woolf, l'échappement est croisé, celui du petit cylindre de droite se rend dans le grand cylindre de gauche et inversement, au moyen de deux tuyaux faisant, intérieurement, le tour de la boîte à fumée. Elle fonctionne donc comme si elle était munie de deux groupes de machines compound à deux cylindres.

Par simplification, on n'a pas placé de garniture autour de la tige commune des tiroirs, entre les deux boîtes. Cette tige traverse simplement un long fourreau ajusté à l'intérieur d'une partie cylindrique venue de fonte avec les deux cylindres. En cas de fuite légère, la vapeur qui peut s'échapper autour de la tige n'est pas perdue, car elle pénètre dans la boîte à tiroir du cylindre à basse pression.

Pour permettre la visite des pistons sans nécessiter un démontage compliqué, le petit piston est fixé à demeure sur sa tige à laquelle le grand piston est maintenu par une clavette goupillée. On peut ainsi démonter facilement les pistons : le petit, en le tirant vers l'arrière avec sa tige, le grand, en l'amenant vers l'avant une fois la clavette démontée. Pour éviter de démonter les glissières pour cette visite, on les a isolées du fond du cylindre ; elles ne sont fixées qu'aux longerons.

La disposition des cylindres de cette machine, encombrante et lourde, n'est pas à recommander.

147. Locomotive du Sud-Ouest russe. — Cette locomotive, étudiée par

MM. Mallet et de Glehn, construite dans les ateliers de la *Société alsacienne*, à peu près à la même époque que la précédente, offre une disposition analogue mais beaucoup plus satisfaisante. Elle a été réalisée en vue de présenter une puissance plus considérable que les locomotives antérieures du même réseau afin d'augmenter la vitesse sur les rampes, seul moyen de gagner du temps, l'administration russe limitant la vitesse maximum à 80 km. à l'heure.

De chaque côté de la machine on a disposé à l'extérieur un groupe de deux cylindres placés en tandem, le petit cylindre devant le grand. Les tiroirs sont intérieurs et disposés verticalement, ils sont actionnés chacun par une fausse tige solidaire d'une tige commune actionnée par la coulisse qui est du type Stephenson.

Comme la précédente, cette locomotive fonctionne suivant le système compound et non comme machine Woolf, l'échappement du petit cylindre de droite se rendant dans le cylindre de gauche et inversement. Le réservoir intermédiaire est constitué par deux tuyaux en cuivre rouge, contournant la boîte à fumée à l'intérieur et reliant séparément, en se croisant, les boîtes à tiroir de droite et de gauche.

Les cylindres de chaque groupe sont plus rapprochés que dans la machine hongroise et on a eu recours, pour faciliter la visite du grand piston, à une disposition ingénieuse. Le plateau avant du grand cylindre à basse pression est concave, les goujons des presse-étoupes des deux cylindres d'un même groupe se trouvent placés dans deux plans rectangulaires et chaque presse-étoupes est percé de trous permettant l'introduction des goujons de la garniture opposée.

Le plateau avant du grand cylindre peut donc être amené contre le plateau arrière du cylindre à haute pression ; le piston à basse pression peut se loger dans l'espace resté libre entre les deux plateaux qui se font vis-à-vis. Lorsque, en cas de réparation, on veut sortir ces pistons, on démanche d'abord le petit piston, maintenu sur la tige commune par un écrou, et on retire le grand piston par l'arrière avec sa tige après avoir démonté le fond et les glissières.

Pour faciliter le démarrage, on peut introduire de la vapeur vive dans le réservoir intermédiaire ; la pression y est limitée à 6 kg. par une soupape de sûreté. On a dû toutefois, comme dans le système *Lindner*, percer de petites ouvertures dans le dos du tiroir à haute pression.

148. Système tandem des Brooks Locomotive Works. — Dans ce dispositif, dû à M. Player, le petit cylindre est situé à l'avant, dans le prolongement du cylindre de détente, dont il n'est séparé que par un plateau muni d'une garniture métallique, que traverse la tige commune aux deux pistons. Le tiroir à coquille du cylindre à basse pression et le tiroir cylindrique du

cylindre à haute pression sont mus par un même mécanisme; mais leurs mouvements relatifs sont renversés au moyen d'un balancier interposé entre eux, et placé à l'intérieur de la boîte à vapeur, ainsi que les tringles qu'il commande, de manière à éviter l'emploi de toute garniture. La vapeur d'échappement de la partie antérieure du petit cylindre se rend dans la boîte à tiroir du grand cylindre en traversant le tiroir à haute pression, tandis que l'admission de la vapeur vive s'opère par les arêtes intérieures. Au moment du démarrage, le mécanicien peut introduire de la vapeur dans la boîte à tiroir du grand cylindre, en ouvrant une soupape réductrice de démarrage, normalement appliquée sur son siège par un ressort hélicoïdal; quand les coulisses sont dans les positions extrêmes de marche avant et arrière, le mécanicien manœuvre une tringle spéciale reliée à l'arbre de relevage et ouvre cette soupape; la vapeur est alors admise dans la boîte à tiroir du grand cylindre jusqu'au moment où le mécanicien ramène les coulisses au cran usuel de marche.

149. Dispositif Woolf, à quatre cylindres, du système Vauclain. — Appliqué pour la première fois, en 1889, à une locomotive du Baltimore and Ohio Rd, le dispositif Woolf, à quatre cylindres, imaginé par M. S. Vauclain, ingénieur en chef des ateliers Baldwin, de Philadelphie, a été appliqué en Amérique, par plusieurs Compagnies. Il est représenté, en Europe, par un certain nombre de machines livrées par la maison Baldwin au gouvernement russe.

La puissance considérable des locomotives américaines entraîne à donner, au cylindre de détente des machines à deux cylindres, un diamètre tel que cette machine s'inscrit difficilement dans le gabarit. D'autre part, la présence d'un bissel ou d'un bogie, à l'avant de toutes les locomotives américaines, rend difficile l'installation du petit cylindre dans le cas des machines à quatre cylindres, en tandem; de plus, étant donné le faible diamètre des roues motrices, il eût fallu donner aux cylindres une inclinaison très forte pour éviter les roues d'avant. L'inventeur avait en vue de concilier l'emploi des quatre cylindres avec une grande simplicité des organes, et d'obtenir un dispositif facilement applicable aux machines existantes sans modification des essieux.

Dans les locomotives du type Vauclain, on dispose de chaque côté de la machine un grand et un petit cylindre, placés l'un au-dessus de l'autre, dans un même plan vertical, et dont les pistons actionnent une crosse commune, sur laquelle s'articule la bielle motrice (fig. 296). La position relative des cylindres d'admission et de détente varie suivant les types de machines. Dans les locomotives dont les roues motrices ont un diamètre supérieur à 1,40 m. environ, le petit cylindre est placé au-dessus du grand; l'inverse a lieu

pour les locomotives à petites roues, afin que le grand cylindre, se trouvant plus haut, puisse passer dans le gabarit. Dans certaines machines de rampes à très petites roues, on incline légèrement les axes des cylindres.

Les efforts différents qui s'exercent sur les tiges des deux pistons ont entraîné l'emploi d'un patin de guidage de grande longueur, pour la crosse commune des tiges de pistons ; les glissières sont du type à quatre guides, disposés deux par deux de chaque côté de la crosse, à égale distance des deux tiges. La distribution est effectuée par un tiroir cylindrique, de forme spéciale, commune aux deux cylindres et situé du côté intérieur ; ce tiroir est actionné, sans intermédiaire d'arbres de renvoi, par des excentriques placés entre les roues. La soupape de démarrage, disposée sous le tiroir, n'est pas automatique, elle reste constamment à la main du mécanicien.

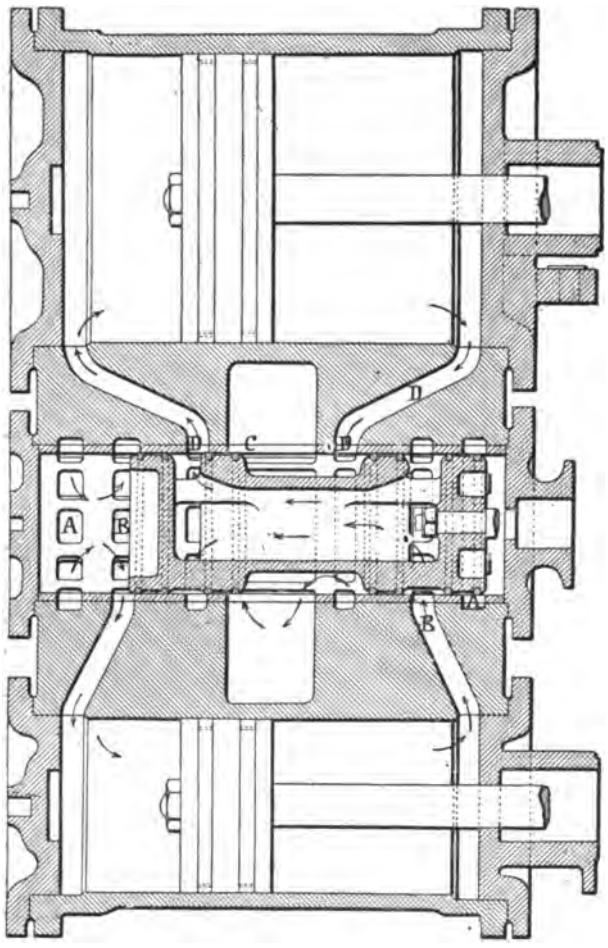


Fig. 296. — Coupe longitudinale des deux cylindres conjugués des locomotives compound du système *Vauclain*.

Le tiroir de distribution se compose d'un piston creux fermé par les bouts ; les orifices A sont en communication directe avec le tuyau de vapeur ; les orifices B correspondent aux lumières du petit cylindre, et les orifices D aux conduits du cylindre de détente, dont l'échappement s'opère par l'orifice C. Dans la position du tiroir représentée par la figure, la vapeur pénètre à l'intérieur du petit cylindre en passant par les orifices de gauche A et par la lumière découverte B. Pendant cette admission, l'échappement est déjà commencé sur la face arrière du petit piston et la vapeur, partiellement détendue, se rend, par l'orifice B, jusqu'à l'orifice opposé D du grand cylindre, en traversant le piston. Les flèches indiquent le chemin

suivi par la vapeur, qui pénètre dans le grand cylindre au moment où l'échappement se produit sur sa face arrière, à travers la cavité annulaire ménagée au centre du tiroir, et, de là, dans l'atmosphère. Les mêmes phases se reproduisent alternativement sur les deux faces du piston.

Le mécanicien peut introduire de la vapeur vive dans le grand cylindre, au moment du démarrage, en ouvrant une petite soupape spéciale qui permet alors à une partie de la vapeur de pénétrer dans le grand cylindre après avoir traversé le petit, comme cela a lieu pour le fonctionnement en compound ; en même temps, une certaine quantité de vapeur vive se rend directement dans le conduit opposé du petit cylindre, qui est ouvert à l'échappement, et, de là, dans le grand cylindre, où elle augmente la pression. Dès que le démarrage est terminé, la vitesse des pistons devient trop grande pour que la vapeur fournie par la soupape de démarrage puisse suffire à augmenter sensiblement la pression au grand cylindre, étant donnée la faible section de cette soupape. Au contraire, dans le cas d'un démarrage difficile, la pression sur le grand piston pourra devenir égale à celle de la chaudière ; le mécanicien disposera donc d'un effort de traction au démarrage plus considérable qu'avec les anciennes machines à simple expansion, dont les cylindres avaient un diamètre inférieur à celui des grands cylindres de ces machines compound.

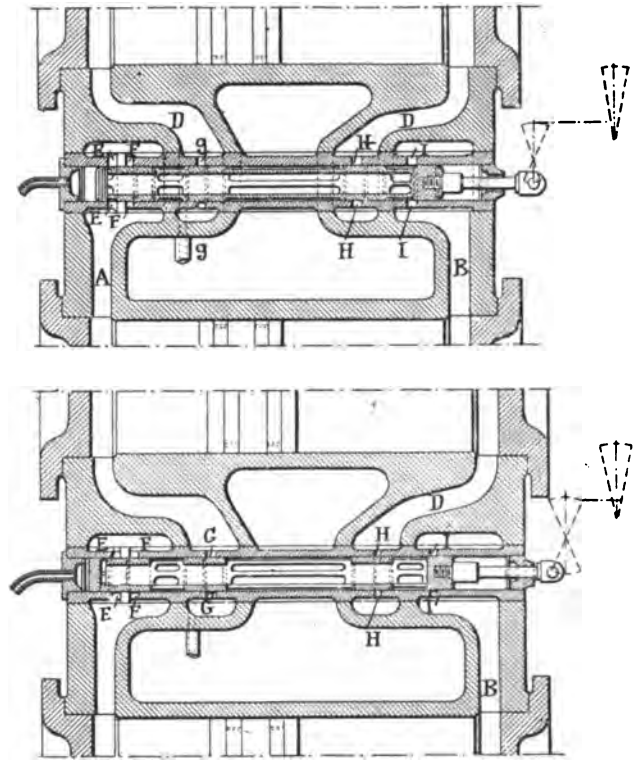


Fig. 297. — Soupape de démarrage (système *Vauclain*).

La vapeur vive, qui passe à travers la soupape de démarrage, agit exactement comme le ferait une fuite autour du piston. Cette soupape (fig. 297) est constituée, en pratique, par un cylindre creux que le mécanicien peut déplacer, au moyen d'un renvoi de mouvement, à l'intérieur d'un tube alésé, dans lequel sont percés des orifices communiquant avec la conduite des deux cylindres. Dans la position de démarrage, la vapeur peut pénétrer à la fois sur les deux faces du petit piston, qui communiquent entre elles par le conduit ménagé au centre de la valve. Outre la position

correspondant au fonctionnement en compound, la valve de démarrage peut occuper une troisième position (fond de course sur l'arrière), dans laquelle elle fait communiquer les deux côtés du cylindre à haute pression avec l'atmosphère, au moyen d'un tuyau qui, en temps normal, sert de purgeur.

Dans un dispositif nouveau de valve de démarrage, breveté par M. Vauclain, un double robinet à deux voies commande quatre petits tuyaux aboutissant, par paires, aux extrémités des deux cylindres admetteur et détendeur. Ces robinets sont placés au-dessous du grand cylindre, du côté intérieur; ils sont manœuvrés par le mécanicien au moyen d'une tringle, et commandent, l'un l'admission de vapeur pour le démarrage, l'autre la purge du grand cylindre.

Malgré la simplicité relative de ce système, qui ne comporte, de chaque côté de la machine, qu'une bielle motrice et qu'une seule distribution, avec une valve de démarrage très peu compliquée, on peut critiquer la commande d'une bielle commune par deux tiges de piston, parallèles, placées à une distance égale ou supérieure à $0^m,500$ d'axe en axe, et qui peuvent être soumises à des efforts différents.

D'après des diagrammes très nombreux, relevés en cours de route, on a constaté que la différence des efforts exercés sur les deux tiges n'est pas aussi considérable qu'on pourrait le croire, surtout en marche normale et avec des charges constantes. L'égalité approximative des efforts sur les deux tiges n'étant atteinte que pour certains crans de marche, M. Vauclain a déterminé les proportions des cylindres de ses machines de sorte que ces crans correspondent au fonctionnement normal. Comme les efforts sont très différents en dehors de ces crans et au moment du démarrage, quand la vapeur vive agit sur le grand piston à une pression élevée, il a fallu étudier un système de guidage capable de résister aux efforts obliques exercés sur la crosse, donner aux tiges de piston un diamètre considérable pour les rendre suffisamment rigides, et établir très solidement leur emmanchement sur la traverse par de longs bossages.

Les diagrammes relevés en cours de route, à diverses allures, montrent que la poussée exercée sur la tige du grand piston est un peu plus grande que la pression exercée sur celle du petit. Le minimum de la différence entre les pressions moyennes a lieu pour une vitesse de 30 milles à l'heure (48 kilomètres); on a au contraire constaté un maximum vers 22 kilomètres.

Le système Vauclain présente d'ailleurs certains avantages qui ont justifié son application à un grand nombre de machines américaines : il permet d'appliquer facilement le mode compound à une locomotive existante, sans modification de mécanisme. Les deux côtés de la machine développent la même puissance, et, en cas d'avarie à l'un des côtés de la machine, on peut éviter une détresse en fonctionnant avec l'autre; enfin la simplicité de ce

dispositif rend son entretien et sa surveillance assez faciles, et permet de le confier à des mécaniciens relativement peu expérimentés.

Il n'est guère applicable qu'à des machines munies à l'avant d'un bissel ou d'un bogie, à cause du poids considérable des quatre cylindres placés dans le même plan transversal. C'est là d'ailleurs un inconvénient qui d'ailleurs est plus marqué encore avec le système tandem.

150. Locomotives à quatre cylindres, concentriques deux à deux. — Un certain nombre de machines à marchandises du *Chemin de fer central mexicain* ont été transformées en locomotives compound à quatre cylindres concentriques par M. Jonhstone, ingénieur en chef de cette compagnie. Le cylindre à haute pression est entièrement compris à l'intérieur du cylindre de détente concentrique; le piston annulaire de ce dernier commande au moyen de deux tiges la même crosse que le piston du premier. La course est commune. Le tiroir plan, unique, placé au-dessus des cylindres, se compose de deux parties : l'une, extérieure, correspond aux lumières du petit cylindre : l'autre, intérieure, commandant les orifices du cylindre de détente, entraîne par la partie extérieure, dont la course est plus grande. Le mécanicien peut changer à volonté le mode de fonctionnement de la machine au moyen d'un robinet à trois voies, qui lui permet d'envoyer de la vapeur vive au grand cylindre au moment du démarrage.

Les diagrammes relevés sur les machines munies de ce dispositif montrent que la période de détente de la vapeur, dans le petit cylindre, est augmentée aux dépens de l'échappement anticipé. Dans le grand cylindre, la période d'admission est accrue, tandis que la période de compression est relativement courte. Il en résulte une distribution assez satisfaisante de la vapeur, qui est achetée, toutefois, au prix d'une certaine complication d'organes.

Un dispositif analogue a été appliqué en 1896 à une locomotive à huit roues accouplées qui figurait à l'Exposition de Nuremberg en 1896.

Ce dispositif est compliqué et de construction difficile; l'étanchéité est difficile à assurer autour des deux segments du piston à basse pression. En outre le diamètre du grand cylindre est nécessairement considérable, ce qui rend son installation difficile dans les locomotives. Il ne présente qu'un intérêt de curiosité.

II

MACHINES A QUATRE MANIVELLES

151. Locomotives compound à quatre cylindres. Type de la Compagnie du Nord. — La Compagnie du *Nord* a mis en service, en 1886, la première

machine compound à quatre cylindres et à deux essieux moteurs qui ait, pensons-nous, été usitée. Cette machine ne différait d'autre part que par des détails du type ordinaire d'express employé jusque-là par la Compagnie, ce qui rendait l'expérience assez concluante et les résultats comparables. Cette machine fut construite dans les ateliers de la *Société alsacienne*, à Belfort, d'après les plans de M. de Glehn; en vue de faciliter le démarrage, on disposa à l'avant deux cylindres intérieurs à haute pression, commandant des manivelles calées à angle droit sur l'essieu milieu, et deux cylindres de détente égaux, à l'extérieur des longerons, actionnant l'essieu arrière qui passait au-dessous du foyer. Il n'y avait pas de bielles d'accouplement.

Cette machine (n° 701) est restée le proto-type du modèle actuellement employé par la Compagnie du *Nord* et qui en diffère surtout par la position, à l'extérieur, des cylindres admetteurs, les cylindres de détente se trouvant à l'intérieur, et par l'addition de bielles d'accouplement.

Encouragée par les excellents résultats donnés par la locomotive n° 701, tant sous le rapport de l'économie de charbon que du bon fonctionnement et de la diminution des frais d'entretien, la Compagnie du *Nord* se décida en 1890 à commander deux autres locomotives compound (n°s 2121-2122), dans lesquelles on tint compte des indications de la pratique nécessitant certains perfectionnements. Ces machines, étudiées et construites par la *Société alsacienne*, à Belfort, sous la direction de son administrateur, M. de Glehn et de M. du Bousquet, ingénieur en chef de la Compagnie du *Nord*, furent mises en service en 1891.

Ce type remarquable de machine, qui a donné toute satisfaction, imité depuis par d'autres Compagnies françaises et étrangères, se distingue surtout de la locomotive 701 par les points suivants :

1° Chaudière plus puissante à foyer profond, le dernier essieu se trouvant à l'arrière et non plus sous la boîte à feu.

2° Accouplement des deux essieux moteurs, destiné à diminuer les patinages qui se produisaient au démarrage.

3° Emploi d'un dispositif permettant, quand la nécessité s'en fait sentir, d'envoyer directement la vapeur des petits cylindres à l'échappement en alimentant les grands cylindres par de la vapeur à 6 kg. prise directement à la chaudière.

4° Addition d'un bogie à l'avant, au lieu de l'essieu porteur.

Ces machines, dont un spécimen figurait à l'Exposition de Chicago en 1893, sont représentées figure 7 et décrites Chapitre II.

La chaudière est timbrée à 14 kg.

Les cylindres HP sont placés à l'extérieur des longerons, vers le milieu; les cylindres à basse pression à l'intérieur, sous la boîte à fumée, disposition

inverse de celle adoptée pour la machine (n° 701). Les premiers actionnent l'essieu arrière, et les seconds l'essieu intermédiaire.

Les deux mécanismes de distribution sont du type Walschaërt et peuvent être liés ou indépendants à la volonté du mécanicien, les deux vis de manœuvre des relevages pouvant être mues séparément ou ensemble, grâce à deux roues dentées à encliquetage engrenant ensemble, et tour à tour, solidaires de ces vis ou folles sur elles.

Pour réduire autant que possible les pertes de temps au démarrage, on a calé les manivelles motrices des cylindres à haute et basse pression à 162°, de telle sorte que l'admission de la vapeur soit toujours assurée dans l'un ou l'autre de ces cylindres. Le calage à 180° serait plus avantageux au point de vue de l'équilibre des pièces en mouvement, mais amènerait quelquefois une incertitude pour le démarrage.

En outre, pour éviter que la vapeur vive admise dans la boîte à vapeur des grands cylindres ne puisse exercer sur les petits pistons une contre-pression nuisible, on a disposé le tuyautage de telle sorte que l'échappement des cylindres à haute pression puisse être directement dirigé au dehors. Cet échappement direct est obtenu à l'aide de deux robinets à trois voies commandés par le mécanicien, au moyen d'un petit piston à vapeur faisant office de servo-moteur. Grâce à cette disposition, l'effort de traction théorique au démarrage peut être porté de 5,070 kg. à 10,000 kg.

En combinant ensemble les différentes dispositions permettant, séparément ou simultanément, l'admission directe aux deux groupes de cylindres, ou à l'un deux seulement avec détente dans l'autre, et l'échappement de vapeur directement dans l'atmosphère, pour chacun d'eux ou de l'un dans l'autre, on peut obtenir quatre modes de fonctionnement distincts :

Dans les dernières machines de ce type, le servo-moteur qui sert à la manœuvre du robinet à trois voies est mû par l'air comprimé, emprunté au réservoir principal du frein, dont ces locomotives sont munies.

La Compagnie s'est livrée à un certain nombre d'expériences ayant pour but de rechercher quels étaient les avantages de l'adoption de quatre cylindres et de l'accouplement. L'accouplement fut supprimé pendant quelques jours sur la machine compound n° 2121. Avec des trains de 145 à 170 t. derrière le tender, malgré le temps favorable, il y a eu patinage à tous les démarrages et même en pleine voie, sur quelques rampes ; le démarrage était beaucoup moins rapide, l'allure de la machine moins douce et il se produisait des trépidations dues à ce que les positions relatives des pièces en mouvement n'étaient plus maintenues par l'accouplement.

L'introduction de vapeur vive au réservoir, en même temps que dans les petits cylindres échappant au dehors, l'accouplement des deux essieux moteurs et l'emploi de la sablière à vapeur assurent à ces locomotives un

démarrage des plus rapides qui est peut-être leur trait le plus caractéristique.

La Compagnie du *Nord* possède maintenant un grand nombre de machines de ce type (fig. 7 et 8) qui assurent dans les meilleures conditions le service des trains les plus rapides.

Le mode compound a été appliqué suivant le même système à différentes locomotives construites par la *Société alsacienne* pour d'autres Compagnies, entre autres à des machines express à quatre roues accouplées et à bogie de l'*Ouest*, à des machines express pour la Compagnie du *Midi*, aux machines à six roues accouplées et à bogie des chemins de fer de l'*Etat badois* et du *Midi* français, etc., avec quelques modifications apportées au changement de marche. Ces différentes locomotives sont décrites ou mentionnées au Chapitre II. Nous examinerons pour le moment le type adopté pour les machines 902 et 903 de la Compagnie de l'*Ouest* auxquelles cette modification a été appliquée pour la première fois.

152. Locomotives compound à quatre cylindres de la Compagnie de l'Ouest. — La Compagnie de l'*Ouest* est la première des grandes administrations qui ait, en France, mis en service une locomotive compound; c'était une machine Webb du petit type, achetée en Angleterre en 1884. Cette machine est depuis lors en service. En 1894, cette Compagnie commanda à la *Société alsacienne*, deux locomotives ne différant des machines à bogie du dernier type de la Compagnie que par l'application qui leur à été faite du système compound à quatre cylindres et par le timbre plus élevé, 14 kg. au lieu de 11 kg.

Ces machines, étudiées et construites sous la direction de M. Clérault, ingénieur en chef du matériel et de la traction, sont puissantes tout en présentant un poids modéré; la disposition générale du mécanisme est semblable à celle des machines du *Nord* et du *Midi* décrites plus haut. La manœuvre du changement de marche a été modifiée et simplifiée, en laissant toute facilité pour rendre chacune des distributions indépendantes. On a disposé deux vis bout à bout, une pour chaque arbre de relevage, la vis située près du volant est creuse et laisse passer une tige prolongeant l'autre vis. Sur chacune des vis sont calées des roues dentées pouvant, séparément ou simultanément engrener sur le volant de commande. Ce volant porte un encliquetage à double manœuvre par une seule poignée mobile pouvant occuper trois positions. Dans la position horizontale, les deux vis sont solidaires du volant et les deux marches sont manœuvrées à la fois. Lorsque la poignée est relevée vers le haut, la vis d'avant est dégagée et le mécanicien manœuvre la distribution des cylindres à basse pression sans que l'autre vis change de place. Lorsque la poignée est abaissée vers le

bas, la vis d'arrière marche seule. Grâce à cet appareil, le mécanicien peut faire varier relativement les degrés de détente à l'intérieur des cylindres à haute et à basse pression.

La même Compagnie, satisfaite du fonctionnement de ces locomotives, a commandé en 1897 un lot important de machines du même type mais plus puissantes.

153. Locomotives compound à quatre cylindres de la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée. — Cette Compagnie a mis en service, au commencement de 1889, trois modèles alors nouveaux de locomotives compound à quatre essieux, à savoir :

1° Machines à voyageurs à grande vitesse (C-1, C-2), à quatre roues accouplées de 2 m. de diamètre et quatre roues porteuses de 1,50 m., deux à l'avant, deux à l'arrière;

2° Machines à marchandises, à huit roues accouplées, de 1,50 m. pour les lignes faciles et à grand trafic (3201, 3202);

3° Machines à voyageurs et à marchandises, à huit roues accouplées de 1,260 m., pour lignes à fortes rampes (4301, 4302),

Ces machines, dont les chaudières étaient timbrées à 15 kg., offraient, au point de vue qui nous occupe, les caractéristiques suivantes :

(*a*). Admission de la vapeur de la chaudière dans deux cylindres intérieurs, dont les pistons commandent l'un des deux essieux du milieu;

(*b*). Accouplement de ces deux essieux;

(*c*). Distribution de vapeur système Walschaërt pour les cylindres d'admission directe comme pour ceux de détente;

(*d*). Changement de marche par un mécanisme unique à contre-poids de vapeur, commandant à la fois les quatre distributions, et établissant entre elles, pour chaque cran de détente, un rapport indépendant de la volonté du mécanicien et rationnellement déterminé;

(*e*). Admission facultative de la vapeur vive dans le réservoir intermédiaire entre les petits et les grands cylindres, mais pour le démarrage seulement.

La vapeur se rend de la chaudière aux cylindres d'admission par un tuyau aboutissant à la boîte à vapeur qui est placée sous les deux cylindres, et qui leur est commune, puis elle passe des petits cylindres aux cylindres de détente par des tuyaux qui traversent la partie supérieure de la boîte a fumée, et dans lesquels elle se réchauffe légèrement ; ces tuyaux forment un réservoir intermédiaire, commun aux deux côtés, dont la capacité varie de trois fois et demie à cinq fois et demie le volume engendré par un des petits pistons pendant une course.

Dans les machines à grande vitesse C-1, C-2, on avait conservé, pour les

cylindres de détente, le diamètre de ceux des anciennes machines non compound (série 111-400), soit 0,50 m. de diamètre et 0,62 m. de course ; les cylindres d'admission avaient 0,31 m. de diamètre et 0,62 m. de course. Ces machines étaient munies d'une distribution du type Walschaërt; mais, pour l'une d'elles, l'excentrique avait été supprimé pour les mouvements des cylindres intérieurs et la coulisse était commandée par un parallélogramme oscillant avec la bielle motrice. Les tiroirs étaient du système Trick, à canal. Pour éviter que la pression dans les petits cylindres, à la fin de la période de compression, ne dépasse la pression à la chaudière, on a augmenté, dans la proportion nécessaire, les espaces morts.

Les cylindres de détente étaient munis chacun d'une soupape de rentrée d'air, destinée à les empêcher d'aspirer les escarbilles de la boîte à fumée, pendant la marche à régulateur fermé.

Le démarrage est facilité par un robinet spécial de prise de vapeur, qui permet au mécanicien d'admettre de la vapeur vive dans le réservoir intermédiaire. Une soupape de sûreté, montée sur ce réservoir, empêche que la pression puisse y dépasser 6 kg. Le démarrage est, en outre, facilité par l'existence de bielles d'accouplement, dont on a jugé le maintien indispensable pour conserver l'invariabilité de la position angulaire relative des deux groupes de manivelles, ce qui permet de régulariser les moments moteurs au démarrage ou en marche, et de diminuer les perturbations dues aux forces d'inertie.

L'appareil de changement de marche adopté est caractérisé par l'emploi de deux cames, montées sur un même arbre horizontal qui commandent les deux barres de relevage des coulisses, et dont les profils sont tracés de manière à maintenir, entre les deux distributions, le rapport voulu. Sur l'arbre porte-came est claveté un pignon, qui engrène avec la vis sans fin conduite directement par le mécanicien. D'autre part, sur le cadre guidé qui sert d'intermédiaire entre chaque came et la barre de relevage correspondante, est attelée la tige de piston d'un contre-poids de vapeur, analogue à celui qui est en service, depuis 1880, sur les machines de la même Compagnie. Le volant du mécanicien, qui est fou sur son arbre et forme écrou sur une partie filetée, lui permettant de se mouvoir parallèlement à lui-même d'une certaine quantité, commande le papillon du distributeur, qui envoie la vapeur du côté du piston où son action est nécessaire.

Le verrouillage des cames s'opère au moyen d'un verrou, sur lequel le mécanicien agit par une poignée à ressort, et qu'il engage dans les encoches d'un pignon porté par l'arbre de la vis sans fin. Le verrouillage des cadres s'opère à l'aide de deux cylindres à huile, dans chacun desquels se meut un piston attelé sur l'une des barres de relevage, et d'un papillon qui ouvre ou ferme à volonté la communication entre les deux côtés du cylindre. La

manœuvre de ce papillon s'opère automatiquement chaque fois que le distributeur du contre-poids s'ouvre ou se ferme. Un seul distributeur suffit pour les deux cylindres à vapeur auxiliaires, et un seul papillon de verrouillage sert pour ouvrir ou fermer les deux cylindres à huile.

Les deux types de machines à huit roues accouplées offraient les mêmes particularités ; ils résultaient également de la transformation de machines existantes.

Dans le courant de l'année 1892, la Compagnie *P.-L.-M.* a mis en service trois locomotives compound à grande vitesse appartenant à deux nouveaux types différant sensiblement de celui de 1888 que nous venons de décrire. Dans ces machines les essieux, au lieu d'être encadrés entre deux paires de roues porteuses, sont reportés à l'arrière ; l'avant est supporté, dans l'une des machines, par un essieu porteur à boîte radiale et, dans les deux autres, par un bogie à déplacement latéral. Les cylindres, au nombre de quatre comme plus haut, sont disposés à l'inverse de ceux des machines précédentes : les cylindres d'admission, qui commandent l'essieu arrière, sont extérieurs, tandis que les cylindres de détente sont placés entre les longerons. Le mécanisme d'admission est du système Walschaërt; celui des cylindres de détente est du type sans excentrique, qui avait déjà été employé pour les cylindres intérieurs d'une des machines du type 1888.

Le changement de marche se fait, comme sur ces dernières, par un mécanisme unique à contre-poids de vapeur, commandant à la fois les quatre distributions, et établissant entre elles, pour chaque cran de détente, un rapport indépendant de la volonté du mécanicien et choisi d'avance.

C'est le même principe que sur les machines C.1 et C.2, mais il est appliqué d'une manière un peu différente. Dans les nouvelles machines, l'axe des cames se déplace horizontalement dans le sens de la longueur, ce qui détermine une rotation simultanée au moyen de secteurs dentés invariablement liés aux cames et engrenant avec une crémaillère fixe. Le déplacement de l'axe des cames s'obtient au moyen d'un écrou lié à cet axe et d'une vis manœuvrée par le mécanicien. Les deux cylindres à vapeur commandant séparément les deux barres de relevage sont placés à l'avant des cames. Deux autres cylindres, placés à l'arrière, sont remplis d'huile et servent à maintenir la position des barres pendant la marche.

Le démarrage s'opère comme il est dit plus haut.

Une soupape de sûreté, placée sur le réservoir intermédiaire, et débouchant dans l'atmosphère, empêche la pression d'y monter au-delà de 6 kg.

Les résultats donnés en service par ces machines ayant été avantageux, la Compagnie de *P.-L.-M.* a mis en service dans le courant de l'année 1894 un nouveau type de locomotives compound à quatre cylindres et à grande vitesse série C-21-60 (voir fig. 19 et 20) dérivé du précédent, dont il diffère toutefois par un certain nombre de points importants :

Comme dans les machines précédentes, les deux cylindres d'admission directe sont extérieurs, et agissent sur le quatrième essieu; ceux de détente sont intérieurs et commandent le troisième essieu. On a encore conservé l'accouplement, les manivelles des cylindres de détente étant calées en avance de 135° sur celles des cylindres d'admission. Si l'on n'a rien changé à la disposition des cylindres, ni à leurs dimensions, on a modifié complètement les conduites de vapeur allant de la chaudière aux petits cylindres et de ceux-ci aux grands; au lieu de leur donner un grand développement dans la boîte à fumée, on s'est attaché à les faire aussi courts et aussi directs que possible, renonçant ainsi à les réchauffer en les déviant à l'intérieur de la boîte à fumée.

Le mécanisme des petits cylindres n'a pas été modifié; mais on a complètement remanié celui des grands cylindres, de manière à rendre le mécanisme intérieur plus accessible et à faciliter son graissage, La distribution des cylindres d'admission directe est du type Walschaërt; mais on a remplacé la distribution sans excentrique, appliquée aux grands cylindres des machines de 1892, par une distribution Gooch.

Le changement de marche s'opère toujours par un mécanisme unique à contre-poids de vapeur, commandant à la fois les quatre distributions et établissant entre elles, pour chaque cran de marche, un rapport indépendant de la volonté du mécanicien.

Les machines 3201 et 3202 de 1888 ont également donné naissance à un type nouveau de locomotive compound à quatre cylindres, à huit roues accouplées de 1,50 m. (voir fig. 54). Dans ces locomotives, les cylindres admetteurs ont été maintenus à l'intérieur et les cylindres de détente à l'extérieur. Les quatre distributions, du système Walschaërt, sont commandées par un appareil à vapeur, à cames, semblable à celui des machines express. Un robinet spécial permet au mécanicien d'envoyer de la vapeur vive dans le réservoir intermédiaire, où la pression est limitée à 7 k, par une soupape de sûreté.

Ces machines, comme les précédentes, sont décrites dans le Chapitre II, consacré à l'étude des principaux types de locomotives usités en France.

154. Comparaison entre le mode compound et la simple expansion opérée à l'aide d'une distribution perfectionnée, dans leur application à la locomotive[1]. — Ces deux systèmes ont en somme le même but : opérer une détente plus grande que ne le permettent les distributions ordinaires par coulisse et tiroir simple. Il est intéressant de les comparer et de faire ressortir leurs avantages et leurs inconvénients relatifs.

Les distributions perfectionnées, soit à déclic, soit à tiroirs indépendants

[1] On consultera avec fruit, sur ce sujet, un très intéressant article publié par M. J. Nadal, ingénieur des Mines, dans la *Revue générale des Chemins de fer*, numéro de juin 1895.

d'admission et d'échappement, permettent de prolonger la détente dans un cylindre unique sans que l'avance à l'échappement et la compression prennent une valeur exagérée. Elles sont, en outre, disposées de manière que l'admission et l'échappement s'opèrent par des conduits distincts, moins longs, de surface et de volume plus réduits. Elles peuvent donc avoir une influence favorable sur l'utilisation de la vapeur, en entraînant une diminution du volume des espaces morts et de la surface refroidissante qu'ils présentent. Elles permettent une économie théorique qui peut s'élever assez haut pour la locomotive, mais dont on ne recueille qu'une faible fraction. C'est que, les diagrammes relevés dans des cylindres pourvus de cette distribution fussent-ils irréprochables, la perte par condensations intérieures dont nous avons parlé ci-dessus et que ces distributions sont impuissantes à atténuer, ne font que croître avec le degré de détente, absorbant une partie du bénéfice dû au prolongement de l'expansion.

Clark a démontré, dès 1850, à la suite d'expériences célèbres, qu'une détente des deux tiers était la plus avantageuse que l'on pût produire dans un cylindre unique et ce fait a été récemment vérifié.

Le principal avantage qu'elles présentent consiste bien moins à produire une économie de combustible qu'à permettre une augmentation de la pression moyenne sur le piston, le diagramme relevé sur les cylindres munis de ces distributions se trouvant renflé par suite de la diminution du laminage et de la compression, et par conséquent de développer une plus grande puissance avec des cylindres d'un volume donné.

D'autre part, la suppression même ou tout au moins la réduction du laminage à l'admission ne paraît pas se traduire en pratique par des résultats avantageux; nous l'avons signalé déjà, à propos de la distribution Stevens, pour laquelle le fait a été dûment constaté au point d'arrêter l'extension des applications de ce dispositif qui donnait des résultats au point de vue économique. Quand l'introduction s'opère très brusquement, il en résulte des chocs violents, à chaque bout de course, cause d'usure plus grande des articulations du mécanisme et même des coussinets des boîtes de l'essieu moteur et une ovalisation plus rapide de ses fusées. C'est là un résultat qu'il faut s'attendre à constater, d'une manière plus ou moins marquée, sur les machines munies de distributions ayant pour objet la réduction du laminage de la vapeur.

L'examen des diagrammes au contraire, loin d'être favorable au mode compound, semble le condamner parce qu'ils ne révèlent que les pertes, d'ailleurs apparentes au point de vue économique, dues aux chutes de pression dans le réservoir intermédiaire et ne mettent en lumière aucun des avantages du système. Il en sera tout autrement si l'on fait intervenir les actions physiques tendant à séparer la machine réelle de la machine idéale supposée

parfaite, dont nous avons présenté plus haut une analyse succincte. La pratique et le raisonnement fondé sur de nombreux résultats d'expérience prouvent alors la supériorité économique du système compound qui permet, aussi bien que les dispositifs précédemment cités, d'augmenter le rapport de détente tout en recueillant une plus grande fraction du bénéfice brut qui peut en résulter. L'augmentation de la détente dans ces conditions permet d'accroître d'autre part la pression de régime et de réaliser de ce fait une nouvelle économie conformément aux lois de la thermodynamique.

Le système compound est le plus économique par principe; si ses avantages ne se sont pas encore fait jour d'une manière plus marquée pour la locomotive, c'est que, malgré l'élévation des pressions réalisées depuis peu d'années, les chutes totales de température dans les cylindres des locomotives, qui fonctionnent sans condensation, ne sont pas assez considérables pour permettre à la double expansion de développer tous ses avantages. Si l'on est conduit dans l'avenir à des pressions plus considérables encore, le mode compound pourra s'imposer et la démonstration de ses avantages ressortira immédiatement des résultats de la pratique.

Au point de vue pratique, le système compouud n'entraîne, quand il comprend plus de deux cylindres, d'autre complication qu'une augmentation du nombre des organes; il ne comporte aucun mécanisme spécial, aucun organe nouveau ou délicat. En outre il permet, nous l'avons vu, de régulariser les moments moteurs et de réaliser les combinaisons particulières offrant des avantages d'une portée assez grande tels que les divisions des efforts sur les essieux, que l'application des distributions perfectionnées ne sauraient présenter.

Celles-ci en revanche ont peut-être un peu plus d'élasticité en ce sens que le rendement des machines qui en sont munies ne subit pas les mêmes modifications que celui des machines compound pour d'importantes variations de travail; mais il ne lui est quand même, croyons-nous, jamais supérieur. Elles ont en revanche des inconvénients pratiques. tels que la complication et le nombre des articulations. Quand elles sont à déclic, elles se prêtent mal au démarrage.

La pratique a montré qu'elles se comportent en service beaucoup mieux que l'on était tenté de le croire, jusqu'ici elles ne paraissent pas avoir augmenté les frais d'entretien; elles consomment plus d'huile de graissage que les distributions par tiroirs ordinaires et que beaucoup de compound à quatre cylindres.

Elles n'offrent pas tous les avantages que l'on serait en droit d'en attendre en ce qui concerne la réduction du laminage et la possibilité d'accroître la vitesse sans augmenter proportionnellement la section des lumières.

Ces distributions paraissent propres à augmenter légèrement le rendement

mécanique en diminuant le frottement absorbé par les tiroirs ; mais le système compound, nous l'avons vu, offre le même avantage. Il est encore difficile, pour le moment, de dire avec certitude lequel l'emporte à ce point de vue, nous pensons cependant que l'avantage doit être du côté des distributions à obturateurs rotatifs indépendants.

Certains ingénieurs sont d'avis, ce qui peut sembler excessif, qu'il y aurait intérêt, au point de vue de l'économie de combustible, à employer plutôt l'excédent de poids résultant de l'application du mode compound à augmenter proportionnellement la surface de grille et la puissance de la chaudière. L'accroissement de puissance ainsi donné se trouve obtenu plus logiquement peut-être par la réduction de la consommation.

Dans les pays neufs, ceux où l'économie du fonctionnement est souvent le plus désirable, à cause du prix élevé des combustibles, où la main d'œuvre est chère et souvent inférieure, le système compound l'emportera sans hésitation sur les distributions améliorées parce qu'il donnera le maximum d'économie, tout en ne comportant que des organes simples, robustes, faciles à réparer. Il impose en même temps un degré minimum de détente, ce qui a son importance dans les pays où les mécaniciens ne reçoivent ni primes ni allocations de combustible.

Il faudra toutefois, pour cette application, adopter un système très simple, celui à deux cylindres par exemple.

Dans les pays où le charbon est très peu coûteux, on devra quand même, dans certains cas, considérer avec soin l'application du mode compound parce qu'il se traduit par une légère amélioration du rendement qui permet d'obtenir, d'une chaudière donnée, un peu plus de puissance sans la forcer davantage.

En résumé, les distributions perfectionnées ne résolvent qu'un des côtés du problème : l'accroissement du degré de détente ; elles sont impuissantes à réduire les pertes internes qui accompagnent cette détente et sont d'autant plus graves qu'elle est plus prolongée. Le bénéfice net qu'elles entraînent est donc égal à celui qui résulte de l'accroissement du degré de détente diminué des pertes provenant des condensations intérieures. Il est en réalité très faible, de 5 à 8 p. 100, croyons-nous, en moyenne.

Le système compound, au contraire, permet tout à la fois d'augmenter le rapport de détente et d'améliorer les conditions dans lesquelles cette détente est opérée, de recueillir, par conséquent, une plus grande fraction du bénéfice dû à l'accroissement de l'expansion. La réduction de consommation peut se monter en service courant à 15 p. 100.

Au point de vue pratique, la réduction de l'introduction dans les cylindres entraîne une irrégularité plus marquée des moments moteurs, une fatigue et une usure plus grande des organes. Le système compound a l'effet contraire, puisqu'il donne la possibilité d'obtenir une détente suffisante avec des admis-

sions plus prolongées. Il n'introduit dans la locomotive aucun nouvel organe, délicat ou nécessitant un réglage minutieux[1]. Par contre, certaines des distributions perfectionnées sont favorables à la marche à grande vitesse, car elles diminuent incontestablement le laminage et la contrepression devant le piston ; le fait semble prouvé pour le système Durant et Lencauchez.

Théoriquement et pratiquement, le mode compound est le plus avantageux au point de vue de l'économie de vapeur et du fonctionnement régulier. Comme tel, il semble constituer le procédé le plus efficace et le plus avantageux pour accroître, dans une certaine mesure, la puissance des locomotives par unité de poids.

Il est toutefois nécessaire de signaler que l'on a pu, dans certains cas, obtenir avec des locomotives à deux cylindres égaux, fonctionnant à de hautes pressions (14 à 15 kg.), des résultats aussi économiques qu'avec des machines compound. Ainsi, les locomotives express du *Caledonian Ry*, timbre 15 kg. (voir : Essai, cités plus loin), ont consommé 5,78 kg. de vapeur (d'après les diagrammes) par cheval-indiqué, chiffre aussi bas qu'aucun autre obtenu à notre connaissance sur des compounds. Il est certain que la grande vitesse de piston des locomotives diminue beaucoup l'influence du mode compound.

Le système compound présente d'autres avantages que celui de l'économie de vapeur pure et simple. Du moment que l'on adopte quatre cylindres pour les raisons que nous avons exposées, il serait peu rationnel de ne pas les utiliser pour opérer une double expansion.

Quant aux types compound à deux cylindres et à quatre cylindres en tandem Woolf, nous ne pensons pas qu'ils présentent d'avantages marqués pour la locomotive et nous ne conseillerions pas leur emploi, sauf dans les quelques cas spéciaux que nous avons signalés.

Aussi n'est-il guère possible de formuler encore, relativement à l'application pratique du mode compound aux locomotives, des conclusions bien nettes. Il n'est pas encore démontré pour tout le monde que les avantages du système soient très supérieurs à ses inconvénients et compensent sa complication plus ou moins grande. Nous croyons, sans pouvoir nous prononcer avec certitude, que l'expérience lui sera favorable et que son emploi deviendra de plus en plus avantageux à mesure que l'accroissement du poids des trains et des vitesses rapprochera davantage la puissance des locomotives des limites qui lui sont imposées.

Les excellents résultats, donnés par les machines à quatre cylindres employées sur plusieurs réseaux français, parlent certainement beaucoup en

[1] On doit ici établir une importante distinction entre les systèmes à déclic et ceux qui, composés uniquement de tiroirs indépendants, d'organes robustes et de coulisses ordinaires invariablement liés, ne présentent en somme aucune nouveauté mécanique et qui, s'ils résolvent le problème d'une manière un peu moins complète que les premiers, n'ont pas dans l'application aux locomotives leurs inconvénients reconnus.

faveur du système compound, sans être toutefois aussi concluants qu'on pourrait le croire, car les machines auxquelles ce système a été appliqué sont par ailleurs plus puissantes que celles qu'elles ont remplacées et renferment divers perfectionnements qui n'ont rien à voir avec le mode compound.

155. Conclusions générales. — La locomotive doit être simple ; elle peut, quand même, nous l'avons vu, être suffisamment économique. Cependant, pour des raisons particulières, l'amélioration de son régime est parfois désirable, dût-elle s'opérer en partie aux dépens de la simplicité. Il en est ainsi, par exemple, dans les contrées où le prix du combustible est élevé. Cette amélioration offre plus d'intérêt encore comme constituant un procédé permettant d'augmenter la puissance des locomotives sans accroître leur poids. Il est donc naturel qu'on se préoccupe de la réaliser à une époque où l'accroissement de tonnage et de vitesse des trains rend la solution de ce problème plus urgente et plus difficile.

Suivant les conditions locales, la nature ou la difficulté du service, le prix du combustible, la valeur de la main-d'œuvre dont on dispose, on accordera plus d'attention aux questions, parfois un peu contradictoires, d'économie ou de simplicité. Si la première de ces considérations doit l'emporter, on pourra avoir recours à l'un des dispositifs dont nous avons parlé, surtout à l'adoption du mode compound qui se répand bien davantage. Il en sera de même dans les cas ou l'on désirera, comme pour certains services à grande vitesse, augmenter la puissance des machines sans accroître sensiblement leur poids. Si, au contraire, c'est la seconde considération qui devient prédominante, on s'attachera à conserver la locomotive à cylindres égaux et à distribution ordinaire, avec son caractère de grande simplicité, de conduite et d'entretien faciles. C'est ainsi que l'on a vu, dans ces dernières années, le système compound disparaître du réseau du *North Eastern Ry*, parce que l'économie constatée en service ne semblait pas en compenser les inconvénients et les frais plus grands d'entretien[1].

De tous les modes d'application du système compound, c'est sans doute le type à quatre cylindres commandant deux essieux distincts, accouplés, qui réunit le plus d'avantages et paraît destiné à se répandre. De fait, le succès du mode compound ne s'est guère affirmé catégoriquement à tous points de vue que sur les réseaux qui ont appliqué ce système lequel, en France, jouit d'une faveur à peu près exclusive.

[1] Il est juste de dire que le système appliqué au *North Eastern* était à deux cylindres et automatique. Or l'automaticité paraît aujourd'hui condamnée, même par quelques-uns de ses premiers promoteurs; elle est peut-être en partie responsable de l'insuccès auquel nous faisons allusion.

CHAPITRE III

RENDEMENT ET EFFET UTILE DES LOCOMOTIVES

Détermination du rendement ou de l'utilisation économique des locomotives. — Expériences effectuées dans le but de les établir. — Définition, mesure et valeur de l'utilisation. — Différents rendements de la locomotive. — Valeur économique de la locomotive au point de vue des dépenses de vapeur et de charbon ou de l'utilisation du capital engagé. — Limite de vitesse imposée à la locomotive. — Poids par unité de puissance. — Augmentation réalisable de la puissance absolue et par unité de poids. — Conclusions.

156. La détermination du rendement ou de l'utilisation économique des locomotives présente un double intérêt, soit qu'il s'agisse de connaître et d'apprécier ce moteur ou de le comparer aux autres genres de machines et aux appareils remorqueurs appartenant à d'autres types, soit que l'on ait pour but de rechercher les moyens propres à améliorer son régime économique ou de se fixer sur la valeur de certains perfectionnements. Dans ce dernier cas, il peut suffire à la rigueur d'évaluer la consommation de la machine rapportée, comme il est d'usage dans la pratique, à la tonne-kilométrique transportée, seule mesure du travail effectif accompli, tenant compte de l'ensemble des utilisations dont le produit donne le rendement final, qui soit susceptible d'être facilement relevée en service courant.

Cette manière d'opérer, suffisante pour les besoins de la pratique, n'offre pas une rigueur scientifique. Elle ne tient pas compte implicitement de bien des éléments variables : nature du profil, vitesse[1], état du matériel roulant, etc., ce qui donne quelque incertitude aux comparaisons effectuées entre des locomotives appartenant à des réseaux différents. Basée d'autre part sur une unité de mesure toute spéciale, elle ne permet aucune comparaison avec les autres types de moteurs.

[1] On ne compare entre elles que les consommations kilométriques de locomotives affectées à des services analogues, celles des trains express ou de marchandises par exemple ; mais les conditions de ces services peuvent présenter des variations importantes, non seulement d'une Compagnie à l'autre mais encore sur le même réseau.

Pour s'éclairer avec certitude sur la valeur économique de la locomotive aussi bien que pour arriver à déterminer d'assez près les lois auxquelles obéissent les variations de son régime dans certaines conditions de fonctionnement, il est nécessaire de ramener sa consommation à une commune mesure pouvant être relevée avec une grande exactitude. La puissance-indiquée développée sur les pistons répond à ce desideratum; elle permet d'apprécier la locomotive en tant que machine à vapeur, en éliminant l'influence des conditions particulières, résultat de sa spécialisation à un service déterminé.

On ne dispose malheureusement encore que d'un nombre assez restreint de données de cette espèce, vu la rareté relative des expériences effectuées sur des locomotives, dans lesquelles on ait mesuré la puissance-indiquée à diverses allures. La concordance des résultats de ces expériences compense toutefois leur petit nombre. D'ailleurs, les essais de ce genre se renouvellent plus fréquemment depuis quelques années grâce aux perfectionnements apportés aux indicateurs destinés aux machines à grande vitesse et surtout à cause du plus grand intérêt que l'on attache actuellement à ces questions[1].

Il est indiscutable que l'étude des courbes relevées sur la locomotive à différentes allures, complétée par d'autres observations permettant de déterminer sa puissance, son utilisation et son régime économique, loin de n'offrir qu'un intérêt académique, peut être féconde en résultats pratiques. Ce n'est pas sans quelque étonnement que l'on est amené à constater combien une machine aussi répandue et utile que la locomotive est longtemps restée mal connue.

Les premières expériences de consommation et de puissance un peu suivies qui aient été effectuées sur des locomotives sont, croyons-nous, celles du *Great Western Ry*, vers 1854, dirigées par Sir Daniel Gooch, et celles de MM. Vuillemin, Guebhart et Dieudonné, ingénieurs de la Compagnie de l'*Est*, dont rend compte un mémoire devenu classique, paru en 1867, sur la *Résistance des trains et la puissance des machines*, complétées en 1880 et 1889 par d'autres essais exécutés par la même Compagnie et dans lesquels on s'est surtout attaché à la mesure du travail sur les pistons et au crochet de traction. Une série d'expériences entreprises de 1880 à 1882 par M. G. Marié à la Compagnie de *Lyon* a donné des résultats pratiques intéressants. Il en a été de même des essais du *Brighton Ry* et de la Compagnie d'*Orléans*. En 1893, M. Desdouits organisa aux Chemins de fer de l'*État* une série complète d'essais effectués en service courant, avec une grande précision, sur plusieurs machines à voyageurs et à marchandises, et qui ont fourni des données d'un grand intérêt. Citons aussi les expériences de M. W. Hill, en 1878, sur le *Cincinnati Hamilton and Dayton*, de MM. Adams et Petti-

[1] L'introduction du mode compound a été pour beaucoup dans ce mouvement, certaines Compagnies ayant voulu se fixer sur la valeur du système et sur les avantages économiques qu'il pouvait entraîner.

grew sur le *London and South Western Ry* en 1895, de la Compagnie de l'*Ouest* en 1896, etc.

De nombreuses expériences ont été effectuées sur des locomotives compound, soit isolément, soit par comparaison avec des machines à simple expansion; les plus connues chez nous sont celles des Compagnies du *Nord* depuis 1891, de *P.-L.-M.* en 1894, de l'*Est* en 1896, etc., et parmi les plus intéressantes de celles qui ont été faites à l'étranger nous devons citer les expériences de M. Borodine en 1882 et 1883 (*Chemins de fer du Sud-Ouest russe*), de M. Urquhart vers 1888 (*Sud-Est russe*), de l'*État wurtembergeois* en 1889 des chemins de fer du *Gothard* et de l'*État prussien* en 1894, de *Rhode Island* et de *Baldwin* aux États-Unis, etc.

Toutes ces expériences ont été effectuées sur la voie, les machines remorquant des trains de poids déterminé. L'Université technique de Purdue (États-Unis) et un peu plus tard la Compagnie du *Chicago and North Western Railroad*, dans ses ateliers de Chicago, ont installé des appareils permettant d'effectuer sur place les essais des locomotives, dans des conditions aussi semblables que possible à celles du service courant. Les roues motrices et accouplées reposant sur des galets de grand diamètre qu'elles entraînaient dans leur mouvement de rotation auquel ne correspondait aucun mouvement de translation, les roues porteuses se trouvant calées. Les axes de ces galets étaient munis de freins dynamométriques créant un effort résistant correspondant à la puissance que l'on voulait développer et permettant de mesurer le travail effectif produit. On évite ainsi les sujétions et une partie des difficultés que présentent les essais en route libre, surtout en ce qui concerne la prise des diagrammes, lès relevés de la vitesse ou du nombre de tours et de la plupart des données des expériences. Cette manière d'opérer qui, bien entendu, ne s'applique à la locomotive qu'en tant que machine à vapeur, permet d'en poursuivre l'étude avec la suite et la précision que comportent les expériences de laboratoire.

157. Définition et mesure de l'utilisation. — La question du rendement des locomotives est assez délicate parce que ce rendement, outre qu'il est assez difficile à déterminer, peut être envisagé à des points de vue différents. On est ainsi amené parfois à comparer d'une manière peu équitable la locomotive aux autres machines ou appareils remorqueurs. Il convient donc tout d'abord de définir l'utilisation de la locomotive et d'examiner la question sous ses différents aspects.

Le rendement d'une machine s'exprime par le rapport entre le *travail recueilli* et la *dépense faite*. En pratique on considère la fonction inverse, et l'on évalue la valeur économique d'une machine par le chiffre de la dépense correspondant à l'unité de travail.

Le travail que l'on doit évidemment considérer en dernière analyse est évidemment le *travail effectif* ou *utile* qui, dans la locomotive considérée en tant que moteur à vapeur, est le *travail à la jante des roues motrices*, et qui, dans la même machine considérée en tant qu'appareil de remorquage, est le *travail au crochet de traction*.

C'est, en effet, ce dernier travail que l'on doit comparer au travail réellement produit lorsqu'on désire rechercher quelle est, en pratique, l'utilisation totale réelle de la locomotive. Le dénominateur de la fraction représentant le rendement sera donné par le *travail indiqué* sur les pistons ou par le *travail à la jante des roues motrices*, suivant que l'on considère le *rendement total* ou seulement le rendement de la machine en tant que *remorqueur*.

M. A. Mallet, dans une excellente étude sur le rendement des locomotives[1], a judicieusement fait observer qu'il n'est peut-être pas très rationnel de prendre comme point de départ la puissance-indiquée parce que l'effort brut exercé sur le piston subit, pour sa transformation en effort de traction à la jante des roues, un déchet qui est constitué par les résistances passives (rendement organique de la machine à vapeur) et ne touche pas directement à la locomotive. Pour écarter de la question tout ce qui n'est pas strictement spécial à la locomotive, M. A. Mallet propose de prendre pour point de départ l'effort de traction à la jante des roues motrices.

On pourrait ainsi comparer en toute équité le rendement de la locomotive à celui des engins électriques de traction par exemple, qui reçoivent l'énergie d'une source extérieure. On éliminerait tout ce qui touche à la machine à vapeur; il nous semble cependant que l'on n'envisage ainsi qu'un côté de la question et que le rendement total mérite peut-être plus encore une étude attentive parce qu'il permettra de comparer en dernière analyse les sommes d'énergie mises en jeu et recueillies et d'apprécier la valeur économique de la locomotive en tenant compte de toutes les pertes que subit le travail entre le point où on le produit et celui où on le recueille.

Il nous paraît donc nécessaire, pour traiter la question d'une manière complète, d'envisager successivement pour la locomotive les trois rendements suivants :

1° Rendement total de la locomotive considérée à la fois comme *machine à vapeur* et comme *appareil remorqueur;*

2° Rendement propre de la locomotive considérée seulement comme *appareil remorqueur ;*

3° Rendement mécanique de la locomotive considérée seulement comme *machine à vapeur*.

Avant d'étudier successivement ces différents rendements, il est nécessaire

[1] Le *Rendement des locomotives*, par A. Mallet. (*Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, année 1895 p. 248.)

de définir les efforts ou les travaux entrant dans les rapports représentant ces diverses utilisations et d'indiquer la manière de les évaluer.

(*a*) *Effort ou travail au crochet de traction.* — On appelle *effort de traction* l'effort parallèle à la voie, évalué en kg., que peut exercer la locomotive et qui est disponible, au crochet d'attelage arrière du tender si la machine est à tender séparé, au crochet de la locomotive si elle porte elle-même ses approvisionnements, pour le remorquage du train,

On le mesure à tout instant, soit au moyen d'appareils dymanométriques placés dans un wagon spécial, attelé immédiatement à l'arrière du tender, soit à l'aide de la méthode proposée et appliquée par M. l'ingénieur en chef Desdouits. On peut aussi, avec moins d'exactitude, l'évaluer en déterminant la résistance du train, d'après les coefficients obtenus au cours d'expériences antérieures et en tenant compte des variations du profil et de la vitesse.

On ne peut attacher de valeur scientifique qu'aux deux premières méthodes.

Les fourgons dynamométriques, employés par quelques-unes des Compagnies de chemins de fer pour rechercher expérimentalement les données relatives au rendement et à l'utilisation des locomotives, renferment ordinairement les appareils permettant :

1° La mesure et l'enregistrement des efforts de traction;

2° L'enregistrement du travail totalisé;

3° L'enregistrement de la vitesse;

4° Le pointage du nombre de tours de roues, par unités et dizaines;

5° L'enregistrement du temps, en fractions de minutes, à l'aide d'une horloge à contacts électriques;

6° Le pointage des km.;

7° L'analyse des gaz de la combustion.

Les efforts de traction sont mesurés à l'aide d'un dynamomètre à ressorts agissant sur un style lequel enregistre les efforts sur une bande de papier qui se déroule proportionnellement aux espaces parcourus. Pour faciliter les recherches et réduire les opérations du dépouillement, on adapte généralement un appareil totalisateur à plateau et molette donnant pour tout instant, par simple lecture, le travail exprimé en kilogrammètres.

D'après la méthode préconisée par M. l'ingénieur en chef Desdouits[1], on se dispense de l'emploi d'un fourgon dynamométrique et on mesure l'effort ou le travail effectifs par des procédés dérivant de la nature même du service demandé à ces machines, c'est-à-dire de la mobilité du système formé par le train et le moteur qui le remorque.

Dans un train en mouvement, l'accélération positive ou négative que pos-

[1] *Revue générale des Chemins de fer*, numéros d'octobre 1881, de mars 1884 et d'avril 1894.

sède à tout instant la masse mobile mesure, en fraction du poids total, l'excès de l'effort moteur développé par la machine sur la résistance propre du train. Si donc on détermine, par deux opérations successives, les valeurs de cette accélération avec ou sans action de la machine, la différence des résultats obtenus donnera la valeur même de l'effort utile et par suite du travail effectif.

La mesure des accélérations peut être obtenue soit par l'emploi du pendule dynamométrique, soit par simple différentiation en se servant d'appareils enregistreurs de la vitesse, soit par une double différentiation, en mesurant au chronomètre les temps employés à parcourir les distances connues.

La valeur de l'effort de traction donne un des éléments de calcul avec les rendements propre ou total de la locomotive et de la consommation de vapeur ou de charbon par cheval utile. Toutefois, en ce qui concerne cette dernière, on ne peut compter obtenir des résultats très intéressant et toujours comparables parce que, comme l'a très bien fait observer M. Desdouits[1], le travail au crochet de traction n'est qu'une fraction variable et essentiellement indéterminée du travail effectivement développé par le moteur; cette fraction peut prendre une valeur élevée et faible, nulle ou même négative, pour « une même valeur de l'effort moteur réel, par le seul fait des variations de profil et de vitesse ».

Le *travail au crochet de traction* (T_c), exprimé en kilogrammètres, est le produit de l'effort de traction en kilogrammes par la vitesse du train en mètres par seconde. On l'exprime en chevaux-vapeur en le divisant par 75.

(*b*). *Effort et travail à la jante.* — L'effort de traction, rapporté à la jante des roues motrices, est celui qui résulte intégralement de l'action de la vapeur sur les pistons et comprend, en plus de l'effort au crochet de traction, celui qui est nécessaire pour assurer le déplacement de la locomotive et du tender considérés en tant que véhicules.

Le travail à la jante, exprimé en kilogrammètres (T_j), est le produit de l'effort précédent, en kilogrammes, par la vitesse en mètres par seconde à la circonférence des roues motrices ou, ce qui revient au même, s'il n'y a pas de patinage, par la vitesse de translation de la machine.

Ce travail est égal à celui qui est développé à l'intérieur des cylindres, diminué de celui qui est absorbé par les résistances passives de la machine considérée comme appareil à vapeur.

(*c*). *Travail indiqué sur les pistons.* — Ce travail se calcule par la formule $P_i = 3{,}49\, d^2\, c\, n\, p$ où d = diamètre des pistons, c = course des pistons (en mètres), n = nombre de tours par minute; P_i est exprimé en chevaux.

[1] *Rendement et utilisation économique des machines locomotives*, par M. Desdouits, Ingénieur en chef du matériel et de la traction des Chemins de fer de l'Etat. *Revue générale des Chemins de fer*, numéros d'avril et de juin 1894.

La pression moyenne p se déduit des diagrammes relevés à l'indicateur dans les cylindres. La formule précédente donne le travail développé dans un cylindre; il faut en doubler le résultat pour en obtenir la puissance totale dans les machines à deux cylindres égaux. Pour les machines compound on ajoute les travaux développés dans le petit et le grand cylindre, calculés séparément.

Le travail-indiqué mesure la quantité totale d'énergie réellement cédée par la vapeur et susceptible d'être réellement convertie en travail utile; on peut le déterminer avec une grande exactitude, mais le relevé des diagrammes est parfois difficile sur les locomotives et ne peut être opéré couramment. Il est certainement préférable, quand on peut être assuré de l'évaluer avec précision, de s'en rapporter au travail effectif, mais la puissance indiquée reste la seule mesure commune permettant des comparaisons avec les machines à vapeur fixes ou marines, ce qui peut avoir un certain intérêt pour se fixer sur la valeur relative de la locomotive en tant que moteur à vapeur.

158. Rendement total de la locomotive considérée à la fois comme machine à vapeur et comme appareil remorqueur. — Ce rendement R est exprimé par le rapport $\frac{T_c}{P_i}$ du travail recueilli au crochet de traction et du travail indiqué sur les pistons. Il n'est comparable directement à celui d'aucune autre machine, la locomotive étant le seul appareil remorqueur *primaire*, c'est-à-dire engendrant lui-même l'énergie qu'il met en jeu et les autres engins de traction constituant des appareils *secondaires* utilisant l'énergie produite dans des stations centrales. (Locomotives sans foyer, à air comprimé, électriques, etc.)

La valeur de ce rendement peut être accrue, grâce à l'amélioration des deux autres rendements partiels, dont le produit le compose et que nous étudierons plus loin.

On trouvera ci-dessous les résultats donnés par quelques-unes des principales expériences effectuées en vue de le déterminer.

Expériences de la Compagnie du chemin de fer de l'Est. — Les expériences effectuées en 1880 pour la Compagnie de *l'Est* sur des locomotives express ont donné les résultats suivants, moyenne de neuf essais[1] :

	MACHINE 502	MACHINE 503
Puissance moyenne indiquée sur les pistons P_i . . . . . chx.	75	262
— au crochet de traction T_c . . . . . —	119	109
Rendement $\frac{T_c}{P_i}$	0,432	0,416

[1] *Revue générale des Chemins de fer.*

Ce rendement de 0,432 et 0,416 est peu élevé, ce qui tient sans doute à ce que les machines étaient loin de développer toute la puissance dont elles étaient susceptibles.

D'autres essais ont été effectués par la même Compagnie en 1888 et 1889 sur les *locomotives-tenders de banlieue à six roues accouplées et à essieu porteur*[1].

Ils ont été conduits avec beaucoup de méthode et de précision et les résultats qu'ils ont donnés constituent des documents fort intéressants. Les efforts sur le crochet de traction ont été mesurés, comme dans les précédentes expériences, à l'aide du wagon-dynanomètre exposé par la Compagnie de l'*Est* en 1878.

Les résultats détaillés de ces expériences sont consignés dans les tableaux A, B, C, D ci-après :

TABLEAU A. — TRAVAIL DÉVELOPPÉ DANS LES CYLINDRES ET TRAVAIL UTILISÉ POUR LA REMORQUE DU TRAIN

Train (40) 13 de 24 véhicules dont 15 à 22 étages, du 7 juin 1888. — 271 tonnes remorquées.

POINTS kilométriques.	PROFILS	EFFORTS de traction sur la barre d'attelage.	VITESSES de marche en kilomètres à l'heure.	DEGRÉS d'admission.	TRAVAIL développé dans les cylindres par seconde.	TRAVAIL utilisé pour la remorque du train par seconde.	RAPPORT du travail utilisé pour la remorque au travail développé par seconde.
	Millimètres.	Kgs.	Kms.	P. 100 environ.	Chev.	Chev.	
3	Rampe de 3,29	3 750	11,5	80	213,4	159,6	0,747
21	— 6,01	4 150	17	—	355,3	262,0	0,734
16,5	Palier.	3 250	28	—	477,3	347,1	0,727
59	— 2,7	3 750	14,5	45	281,0	201,2	0,715
69,8	Palier.	3 100	22	--	357,1	252,3	0,706
80	—	2 750	25	—	369,1	254,4	0,694
33	—	3 100	31	—	510,6	355,6	0,690
65,2	Rampe de 3,6	3 400	32	—	602,2	402,6	0,669
22	— 6,899	3 350	33,5	—	621,1	415,1	0,668
44	Palier.	3 050	35,5	—	613,1	400,3	0,653
27,8	—	3 400	37	—	705,6	465,5	0,659
53	—	3 450	39	—	751,1	497,8	0,662
11,6	Rampe de 3,27	2 550	30	33	477,3	347,1	0,707
23	— 6,899	2 750	34,5	—	528,9	351,0	0,663
39	Palier.	3 000	40,5	—	667,8	449,6	0,673
20	Rampe de 6,04	2 650	42,5	—	612,4	417,0	0,668
24	— 1,15	2 550	44,5	—	638,1	419,6	0,658
50	-- 5,801	2 450	47	—	640,1	425,9	0,665
60	— 2,16	2 400	48	—	659,5	426,2	0,630
77	-- 4,498	1 950	50	—	568,0	360,8	0,635
55	— 2,6	2 300	53	—	719,7	451,0	0,627
63	Palier.	1 800	54	25	585,9	359,6	0,613
30	—	1 800	58	—	638,6	393,3	0,614
74	Rampe de 0,9	1 650	59	—	607,9	360,2	0,592

Les tableaux A et B établis pour des trains de 24 véhicules, de 275 tonnes environ, locomotive non comprise, donnent, pour divers points kilométriques,

[1] Voir la notice de la Compagnie sur les *Objets exposés en* 1889.

TABLEAU B. — TRAVAIL DÉVELOPPÉ DANS LES CYLINDRES ET TRAVAIL UTILISÉ POUR LA REMORQUE DU TRAIN

Train (40) 24 de 24 véhicules dont 15 à 2 étages, du 7 juin 1889. — 278 tonnes remorquées.

POINTS kilométriques.	PROFILS	EFFORTS de traction sur la barre d'attelage.	VITESSES de marche en kilomètres à l'heure.	DEGRÉS d'admission.	TRAVAIL développé dans les cylindres par seconde.	TRAVAIL utilisé pour la remorque du train par seconde.	RAPPORT du travail utilisé pour la remorque au travail développé par seconde.
	Millimètres.	Kgs.	Kms.	P. 100 environ.	Chev.	Chev.	
4	Rampe de 2,74	3 650	13	45	230,6	175,6	0,761
16	— 4,95	3 950	14	—	272,9	204,6	0,750
32	Palier.	3 500	14	—	240,9	181,3	0,752
12	Pente de 3,27	3 500	15	—	261,6	198,0	0,755
35,5	Rampe de 1,1525	2 100	53	33	561,8	411,8	0,733
83	— 5,999	2 500	33	—	419,0	296,0	0,706
82	— 5,999	2 750	33	—	466,5	335,8	0,720
85	— 5,999	2 200	35	—	403,4	284,9	0,706
80	— 5,999	2 750	36	—	520,6	366,4	0,704
78	— 6	2 950	38	—	595,1	415,0	0,697
8	Palier.	2 550	42	—	560,7	396,3	0,707
46	— 5,481	2 450	42	—	579,2	380,7	0,657
26	Pente de 5,95	2 250	43	—	532,3	358,0	0,672
68	Palier.	2 350	44	—	570,0	382,6	0,671
14	Rampe de 3,779	2 350	52	—	672,6	452,1	0,672
40	— 3,499	2 100	53	—	620,6	411,8	0,661
42	— 3,499	2 350	53,5	—	706,7	465,1	0,658
19	Pente de 6,04	2 200	53,5	—	726,9	476,2	0,655
11	— 3,27	1 800	53	25	585,1	353,0	0,603
30	Palier.	1 650	59	—	598,3	382,0	0,638
28	—	1 550	61	—	555,1	349,8	0,630
75	Pente de 4,498	1 100	64	15	501,1	248,6	0,524

TABLEAU C. — TRAVAIL DÉVELOPPÉ DANS LES CYLINDRES ET TRAVAIL UTILISÉ POUR LA REMORQUE DU TRAIN

Train 3 de 15 véhicules, du 8 juin 1889. — 186 tonnes remorquées.

POINTS kilométriques.	PROFILS	EFFORTS de traction sur la barre d'attelage.	VITESSES de marche en kilomètres à l'heure	DEGRÉS d'admission.	TRAVAIL développé dans les cylindres par seconde.	TRAVAIL utilisé pour la remorque du train par seconde.	RAPPORT du travail utilisé pour la remorque au travail développé par seconde.
	Millimètres.	Kgs.	Kms.	P. 100 environ.	Chev.	Chev.	
3	Rampe de 3,29	3 508	11	80	196,4	142,5	0,726
14,5	Palier.	3 200	20	45	331,2	236,8	0,715
13,3	—	2 750	38	—	609,1	386,7	0,637
9,2	—	2 800	15	33	226,9	155,4	0,685
10,6	—	2 500	37,5	—	547,1	346,9	0,634
36,9	Pente de 3,46	2 400	46	—	643,5	408,5	0,635
28,8	Rampe de 3,49	1 800	48	—	524,1	319,7	0,608
19,2	Pente de 3,32	2 100	52	—	642,2	404,	0,627
30,9	Rampe de 3,49	1 700	57	—	635,6	358,5	0,561
5	— 3,37	2 150	34	25	434,9	270,5	0,620
6	— 3,37	1 700	41	—	421,1	257,9	0,612
1,5	— 2,75	1 900	43	—	490,6	302,3	0,615
8,5	Palier.	1 550	44	—	407,4	252,3	0,617
11,8	Rampe de 0,95	1 600	50	—	526,5	296,0	0,562
32,4	Palier.	1 300	62	—	620,0	298,2	0,481
21,8	Rampe de 0,35	1 350	66	—	670,6	329,7	0,491
16,8	Pente de 3,728	1 250	67	—	666,7	309,9	0,464
39,8	Palier.	1 250	69	—	687,2	319,1	0,466
24,5	Rampe de 0,09	1 250	71	—	711,4	341,5	0,161
35,4	Pente de 3,865	1 000	61	15	543,5	225,7	0,416

les efforts de traction sur la barre d'attelage, la vitesse de marche en kilomètres à l'heure, le degré d'admission dans les cylindres, le travail développé par seconde et résultant des diagrammes relevés à l'indicateur, le travail utilisé pour la remorque du train, enfin le rapport de ce dernier au travail développé dans les cylindres.

Les tableaux C et D donnent les mêmes indications pour des trains de 15 véhicules, pesant de 180 à 186 tonnes.

TABLEAU D. — TRAVAIL DÉVELOPPÉ DANS LES CYLINDRES ET TRAVAIL UTILISÉ POUR LA REMORQUE DU TRAIN

Train 22 de 15 véhicules, du 8 juin 1889. — 180 tonnes remorquées.

POINTS kilométriques.	PROFILS	EFFORTS de traction sur la barre d'attelage.	VITESSES de marche en kilomètres à l'heure.	DEGRÉS d'admission.	TRAVAIL développé dans les cylindres par seconde.	TRAVAIL utilisé pour la remorque du train par seconde.	RAPPORT du travail utilisé pour la remorque au travail développé par seconde.
	Millimètres.	Kgs.	Kms.	P. 100 environ.	Chev.	Chev.	
13,8	Palier.	2 750	16	33	233,4	162,8	0,697
8,5	—	2 950	17	—	234,4	166,7	0,711
35,7	—	2 600	17	—	237,5	163,5	0,690
17,9	—	2 700	18,5	—	441,3	279,4	0,644
9,8	—	2 200	33	—	423,1	268,6	0,638
27	—	2 200	37	—	471,7	301,1	0,637
43,2	Pente de 4,88	1 900	52	—	616,2	365,6	0,594
15,2	Rampe de 3,48	1 850	60	—	759,0	410,7	0,541
7,1	Palier.	1 650	40	25	398,8	244,2	0,612
11,6	Pente de 0,95	1 550	51	—	500,3	292,5	0,584
34,3	— 3,64	1 700	55	—	616,0	345,9	0,562
37,3	— 3,19	1 300	60	15	502,8	264,4	0,529
24,3	— 0,09	1 350	61	—	611,2	304,7	0,498
40,2	— 0,1	1 200	62	—	561,1	275,3	0,491
31,3	— 3,49	1 125	64	—	555,5	266,4	0,479
21,1	— 0,35	1 000	65	--	526,5	252,5	0,480

Ces expériences montrent que le rapport du travail utilisé pour la remorque au travail produit par la vapeur dans les cylindres diminue avec la vitesse et augmente avec le degré d'introduction. Ce rapport varie entre 0,76 et 0,52 pour les trains de 24 voitures et entre 0,72 et 0,42 pour ceux de 15 voitures seulement.

On remarquera que les plus bas de ces rendements correspondent à une vitesse de 55 à 65 kilomètres, assez élevés pour des machines montées sur des roues accouplées de 1,56 m. seulement. Avec un tel diamètre de roues, on ne saurait guère dépasser économiquement une vitesse de 55 kilomètres. Il est d'ailleurs à remarquer que le rendement est plus élevé, à des vitesses données, lorsque, le train étant plus lourd, la machine développe plus de puissance. Ainsi à la vitesse de 52 kilomètres à l'heure, le rendement est de 0,672 (tableau B) pour une charge de 278 t. correspondant à une introduction de 33 p. 100, tandis qu'à la même vitesse il n'est que de 0,562 (tableau C)

pour une charge de 186 t. avec une introduction de 25 0/0. C'est là d'ailleurs un résultat que l'on établit *à priori* puisque, le poids de la machine étant une constante, la proportion de travail absorbée pour sa remorque est d'autant plus grande que le poids du train est moindre.

Expériences de la Compagnie du chemin de fer d'Orléans. — Cette Compagnie a effectué en 1885 un certain nombre d'expériences comportant entre autres la mesure du travail-indiqué et du travail-effectif au crochet de traction. Elles ont été opérées en service régulier sur des machines express à quatre roues accouplées du type usuel de la Compagnie, remorquant un train de 240 t., et ont donné les résultats suivants :

			Mach. 398.	Mach. 394.
Vitesse		km.	57	«
Travail moyen indiqué sur les pistons	P_i	chev.	574,3	536,6
— utile au crochet du tender	T_c	—	344,6	322,0
Rapport	$\frac{T_c}{P_i}$	—	0,609	0,602

Expériences de la Compagnie du chemin de fer du Nord. — Ces expériences, effectuées en service, ont porté sur les *locomotives compound à quatre cylindres*, à grande vitesse, remorquant un train du poids de 180 t. Les résultats moyens sont consignés ci-dessous :

			(1)	(2)
Vitesse moyenne		km.	80,4	75,8
Puissance indiquée	P_i	chev.	948	784
— effective au crochet du tender	T_c	—	445	403
Rapport	$\frac{T^c}{P_i}$	—	0,47	0,51

Ces résultats sont satisfaisants étant donné la vitesse élevée et surtout que ces locomotives sont accompagnées d'un tender lourd et de grande contenance.

Expériences de la Compagnie du chemin de fer de Paris-Lyon-Méditerranée. — Des expériences dynamométriques très complètes ont été effectuées en 1894 par la Compagnie de *Lyon* sur les *machines compound à quatre cylindres* du dernier type, remorquant des trains rapides en service courant. Nous donnons ci-contre quelques-uns des résultats détaillés de ces essais pour lesquels nous renvoyons à l'intéressant article de M. Privat[1]. Les rendements ont varié dans de larges limites, à des vitesses même peu différentes, pour des raisons particulières, encore mal définies, suivant la proportion relative des introductions aux petits et aux grands cylindres ; ils ne peuvent

[1] *Revue générale des Chemins de fer*, numéro de mars 1896.

EXPÉRIENCES DE LA COMPAGNIE DE LYON

(*Machines C.-21-60*).

VARIATIONS DE LA PUISSANCE-UTILE, DE LA PUISSANCE-INDIQUÉE ET DES DÉPENSES DE VAPEUR CORRESPONDANTES

NUMÉROS des expériences	CRANS de marche. (1)	VITESSE moyenne.	PUISSANCE utile.	PUISSANCE indiquée.	POIDS total de vapeur dépensée par heure.	POIDS de vapeur dépensée par heure et par cheval utile.	POIDS de vapeur dépensée par heure et par cheval indiqué.
21	2—4	79,5	165	600	3 700	22,4	6,2
25	2—4	71,9	196	564	3 482	17,8	6,2
26	2—6	70,8	302	613	4 025	13,3	6,5
27	2—4	76,9	196	585	3 692	18,8	6,3
28	2—6	74,7	294	637	4 187	14,2	6,6
29	2—4	74,4	194	599	3 495	18,0	5,8
30	2—6	72,6	317	663	4 247	13,4	6,4
41	2—4	81,7	133	597	3 605	27,1	6,0
42	2—7	86,0	283	700	4 787	16,9	6,8
45	2—4	88,2	112	668	4 042	36,0	6,1
46	2—7	83,2	320	684	4 842	15,1	7,1
47	2—4	73,0	184	552	3 442	18,6	6,2
49	2—4	76,7	179	567	3 485	19,5	6,1
50	2—7	76,7	333	659	4 505	13,5	6,8
63	3—4	87,0	345	845	6 035	17,4	7,1
64	3—5	92,2	428	979	6 757	15,8	6,9
65	3—4	88,6	322	898	6 225	19,3	6,9
66	3—5	92,6	374	956	6 640	17,7	6,9
75	3—4	73,7	413	788	5 540	13,4	7,0
76	3—6	75,8	510	853	6 090	11,9	7,1
77	3—4	72,6	407	798	5 575	13,6	7,0
78	3—6	73,1	506	836	5 900	11,6	7,1
79	3—4	89,8	347	920	6 180	17,9	6,7
80	3—6	90,2	483	962	6 907	14,3	7,2
81	3—4	79,0	308	844	5 752	14,4	6,8
82	3—6	82,5	492	913	6 542	13,3	7,2
85	3—4	79,1	390	852	5 790	14,8	6,8
86	3—6	85,4	483	932	6 677	13,8	7,2
87	3—4	77,6	418	825	5 840	13,9	7,1
205	5—5	69,9	800	1 163	8 880	11,1	7,6
206	5—6	76,2	836	1 228	9 975	11,9	8,1
207	5—5	73,5	813	1 180	9 370	11,5	7,9
208	5—6	82,6	857	1 290	10 300	12,0	8,0
217	5—5	77,1	771	1 205	9 685	12,5	8,0
223	5—5	67,1	783	1 150	8 875	11,3	7,7
224	5—7	74,9	909	1 213	10 312	11,3	8,5
227	5—5	72,6	811	1 208	9 562	11,7	7,9
228	5—7	80,3	887	1 248	10 575	11,9	8,5

NUMÉROS des expériences	CRANS de marche. (1)	VITESSE moyenne.	PUISSANCE utile.	PUISSANCE indiquée.	POIDS total de vapeur dépensée par heure.	POIDS de vapeur dépensée par heure et par cheval utile.	POIDS de vapeur dépensée par heure et par cheval indiqué.
31	2—4	70,5	206	571	3 537	17,1	6,2
32	2—6	77,6	288	652	4 245	14,7	6,5
34	2—6	80,1	285	683	4 335	15,0	6,3
35	2—4	78,4	173	603	3 625	20,8	6,0
38	2—6	85,7	250	680	4 492	17,9	6,6
39	2—4	76,9	200	626	3 860	19,3	6,2
40	2—6	88,2	227	685	4 385	19,3	6,4
52	2—7	77,0	315	664	4 425	14,0	6,7
53	2—4	72,0	186	562	3 587	19,2	6,4
54	2—7	78,8	300	648	4 435	14,7	6,8
55	2—4	77,0	148	604	3 715	25,1	6,2
57	2—4	75,6	158	582	3 485	22,0	6,0
58	2—7	77,4	299	648	4 380	14,6	6,8
60	2—7	85,3	288	679	4 695	16,3	6,9
67	3—4	81,8	366	843	5 835	15,9	6,9
68	3—5	88,6	406	929	6 325	15,6	6,8
71	3—4	71,2	400	758	5 472	13,7	7,2
72	3—5	81,0	414	851	6 075	14,7	7,1
88	3—6	86,0	494	932	6 730	13,6	7,2
89	3—4	85,5	343	918	6 310	18,4	6,9
90	3—6	92,5	424	973	7 052	16,6	7,2
91	3—4	81,0	350	878	6 050	17,3	6,9
92	3—6	91,5	441	975	7 097	16,0	7,3
95	9—4	87,0	342	908	6 355	18,6	7,0
96	3—6	93,1	458	990	7 155	15,6	7,2
97	3—4	80,8	390	799	6 015	15,4	7,5
98	3—6	90,5	473	970	7 005	14,8	7,2
99	3—4	66,0	411	700	5 375	13,0	7,7
100	3—6	69,5	475	815	5 965	12,5	7,3
218	5—6	83,9	798	1 290	10 795	13,5	8,4
219	5—5	71,3	793	1 180	9 280	11,7	7,9
220	5—6	83,2	842	1 290	10 645	12,6	8,3
241	5—5	82,7	800	1 278	10 115	12,6	7,9
242	5—6	89,6	824	1 330	10 900	13,2	8,2
237	5—5	94,9	780	1 422	11 350	14,5	8,0
238	5—7	97,5	828	1 370	11 712	14,1	8,5
239	5—5	82,5	756	1 225	9 770	12,9	8,0
240	5—7	91,1	849	1 280	11 050	13,0	8,6

(1) Le 1er chiffre de cette colonne indique, en dixième de la course, l'introduction au cylindre d'admission.
Le 2e — — — de détente.

donc, par suite du système spécial de la machine, prêter à une généralisation complète, mais n'en forment pas moins un ensemble de documents d'un grand intérêt. Le rendement que nous examinons actuellement a été compris entre 0,31 et 0,75. Il y a lieu de remarquer que la machine est du type compound et présente un meilleur rendement quand elle travaille à pleine puissance qu'avec une grande détente et une introduction trop faible au grand cylindre. Les courbes représentant les variations de la puissance-indiquée et de la puissance-utile pour les marches aux divers crans montrent une diminution très nette et continue du rendement avec la vitesse, résultat dû surtout à l'accroissement de la résistance propre de la machine.

Expériences de la Compagnie de l'Ouest. — A la vitesse de 52 km. en rampe de 8 mm. avec un train pourtant assez léger, on a obtenu (locomotives express à bogie 963-990) les résultats suivants :

Travail indiqué sur les pistons	P_i	chev.	575
— au crochet de traction.	T_e	—	337
Rendement	$\frac{T_e}{P}$	—	0,58

résultat assurément satisfaisant, d'autant plus que la machine n'était pas à la limite de sa puissance.

Expériences du Cincinnati, Hamilton and Dayton. — Les expériences ont porté sur une machine à quatre roues accouplées remorquant en palier, sur une distance de 92 km., un train de marchandises de 660 tonnes à petite vitesse. La machine n'était pas rentrée aux ateliers depuis vingt- deux mois. Les résultats moyens des trois essais sont consignés ci-dessous.

	1	2	3
Puissance moyenne indiquée P_i . . . . . chx.	292	369	389
— au crochet du tender T_e . . . . . —	245,6	311	327
Rapport $\frac{T_e}{P_i}$	0,83	0,85	0,84

Ces coefficients de rendement sont très élevés, ce qui tient à la faible vitesse et au poids très peu considérable de la machine par rapport au poids total des trains, environ 10 0/0 seulement.

Expériences de la Compagnie du chemin de fer du Gothard. — Cette compagnie a effectué en 1894 une série d'expériences sur ses nouvelles locomotives compound remorquant des trains de voyageurs sur des lignes comportant des rampes 22 à 26 mm. à des vitesses de 32 à 42 km. à l'heure. La

puissance effective moyenne a été de 716 à 810 chev. et le rendement $\frac{T_c}{P_i}$ du travail au crochet de traction au travail-indiqué a varié entre un minimum de 0,52 et un maximum de 0,54. Ces résultats sont obtenus sur des fortes rampes, on ne doit pas l'oublier, et la charge remorquée était peu considérable par rapport au poids de la machine et de son tender. On aurait relevé des utilisations très supérieures si, la locomotive ayant développé la même puissance, avait eu à remorquer en palier ou sur des rampes de faible inclinaison, à une vitesse identique, des trains beaucoup plus lourds.

Les machines articulées, à quatre cylindres, du système A. Mallet, de la Direction de Cologne (R. G. du Rhin) donnent, à 20 km. à l'heure, un rendement d'environ 0,78.

Essais du Caledonian Railway. — Ces essais, effectués sous la direction de M. D. Drummond, sur des locomotives à quatre roues accouplées, remorquant en service des trains express réguliers, ont donné les résultats suivants :

Numéros des machines		76	77	78	79
Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure .		77	75	78	82
Puissance-indiquée	P^i	1025,3	924	1085	1090
— effective au crochet de traction.	T_c	715,2	652	739,9	775,6
Rapport	$\frac{T_c}{P_i}$	69,76	70,54	68,76	71,12

Le rendement, variant de 68,16 à 71,12, est élevé pour des vitesses aussi grandes, ce qui doit être attribué au poids peu considérable de la machine (77 t., tender compris) par rapport à celui du train (153 à 246 t.).

Cela montre une fois de plus l'avantage que l'on peut avoir, au point de vue du rendement, à l'emploi de machines relativement légères et travaillant à pleine production.

En résumé, de tous les essais accomplis à ce jour on peut déduire que le rendement total de la locomotive (R), exprimé par le rapport du travail utile au crochet de traction au travail-indiqué sur les pistons varie normalement, entre 0,40 et 0,80 suivant la vitesse et les conditions dans lesquelles travaille la machine, selon le poids du tender et des approvisionnements, etc.

En principe, on peut admettre que, pour les grandes vitesses, l'utilisation est voisine de 0,60 dans les machines bien construites, mais elle peut descendre à 0,40 si le poids de la machine est considérable par rapport à celui du train ou si la locomotive présente une résistance exceptionnelle. Le maximum de rendement semble atteint lorsque la machine remorque en palier, à pleine charge, un train lourd à une vitesse suffisamment élevée pour être capable de développer toute sa puissance ; dans ces conditions, le rendement peut s'élever à 0,76 et atteint même parfois 0,85 pour les trains de marchandises.

Toutes choses égales d'ailleurs, les machines-tenders ont un meilleur rendement que les machines à tender séparé parce que leur poids total, approvisionnements compris, est moins considérable par rapport à celui du train.

159. Rendement de la locomotive considérée seulement comme machine à vapeur. — Le rendement organique R′ de la locomotive considérée en tant que machine à vapeur ne diffère pas de celui des autres types de moteurs et les quelques expériences effectuées en vue de le déterminer lui attribuent une valeur moyenne de 0,80 à 0,93. Il est égal au rapport du travail à la jante des roues motrices au travail-indiqué sur les pistons et la perte qu'il représente est entièrement due aux résistances passives du mécanisme au frottement des pistons et des tiroirs, des patins de glissières, des diverses articulations, de l'essieu moteur dans ses boîtes. Le seul moyen de réduire cette perte et d'améliorer R′ consiste donc à diminuer ces frottements. On y arrive par un choix judicieux des matériaux constituant les surfaces frottantes, par une proportion convenable de ces surfaces et par un bon graissage. D'autre part, ce rendement s'accroît à mesure que les efforts diminuent et que les moments moteurs sont plus réguliers. Les locomotives compound offrent à ce point de vue un certain avantage suffisant pour compenser, dans bien des cas, l'addition d'un ou de deux cylindres supplémentaires.

160. Rendement de la locomotive considérée comme appareil remorqueur. — On appelle ainsi le rapport R″ entre le travail au crochet de traction et le travail à la jante $R'' = \frac{T_c}{T_j}$. Autrement dit, $R'' = \frac{R}{R'}$. En prenant pour R′ une valeur moyenne de 0,86 et pour R les différentes valeurs relevées entre 0,48 et 0,80, on obtient pour R″ les valeurs citées ci-dessous :

Valeurs de R =	0,48	0,55	0,60	0,70	0,80
Valeurs de R′ =	0,55	0,63	0,69	0,81	0,93

Dans les expériences du *Gothard* citées plus haut, dans les circonstances les plus défavorables, la charge remorquée étant faible à cause des rampes de grande inclinaison, ce rendement a varié entre 0,581 et 0,655. Il est élevé à 0,88 pour les machines Mallet de l'*Etat prussien*, à quatre cylindres, travaillant à pleine charge.

L'effort F_c au crochet de traction est égal à l'effort à la jante F_j, diminué de celui qui est nécessaire pour assurer le déplacement de la locomotive et de son tender, à la vitesse et sur le profil donné. Si nous appelons P le poids de la machine et du tender, r la résistance moyenne par tonne en palier et r' la résistance due à la gravité sur les rampes[1], on aura

$$F_c = F_j - P\,(r + r')$$

[1] Voir la note de M. A. Mallet citée plus haut.

et le rendement devient

$$R'' = \frac{F_i - P(r + r')}{F_i} = 1 - \frac{P}{F_i}(r + r')$$

On en conclut que le rendement R″ peut être nul si le second terme est égal à l'unité, c'est-à-dire si l'effort de traction est employé intégralement à la traction de la locomotive elle-même ; c'est le cas des voitures automobiles. La nullité du rendement dans ce cas n'est qu'apparente et provient de ce que l'on ne considère que le rendement de la locomotive employée comme *remorqueur*.

Le rendement diminue quand le second terme augmente, c'est-à-dire à mesure que la résistance de la machine devient plus grande. On obtiendra un rendement nul, en admettant, ce qui n'est pas, que la puissance de la machine soit assez grande pour lui permettre de remonter une rampe d'inclinaison telle que le second terme devienne égal à l'unité.

On voit de même que le rendement des locomotives diminuera à mesure que l'on voudra, sans réduire la charge à remorquer, augmenter la vitesse des trains, parce que les machines devront être de plus en plus puissantes, c'est-à-dire de plus en plus lourdes, à moins que l'on ne trouve un moyen d'accroître leur puissance par unité de poids.

L'accouplement donne évidemment une résistance supplémentaire dont il doit être tenu compte, moins par le frottement des têtes de bielles qui servent à l'effectuer qu'en raison du frottement de glissement résultant de l'inégalité de diamètre (fatale en pratique, les bandages ne s'usant pas également), des différentes paires de roues accouplées et que par suite de la plus grande raideur de la machine au passage des courbes. Il paraît évident que le rendement des machines sera d'autant meilleur que le nombre des essieux accouplés sera moindre. Il est bien regrettable, à ce point de vue, que des expériences suivies n'aient pas été entreprises sur certaines des puissantes locomotives à roues libres remorquant les plus rapides des express anglais. Il ne faut toutefois pas s'exagérer la résistance due à l'accouplement, les différences de rendement dont il s'agit ici ne devant être qu'assez faibles.

D'autre part, l'utilisation se trouvera d'autant plus élevée que le poids de la machine, toutes choses égales d'ailleurs, sera moins considérable. On a donc, de ce côté, tout intérêt à réduire le poids des machines par unité de puissance. Il ne faut pas oublier cependant qu'en allant trop loin dans cette voie on abaisserait l'utilisation de la locomotive en tant que moteur à vapeur, les chaudières trop forcées n'étant pas économiques, et que l'on pourrait perdre de ce côté plus que l'on ne gagnerait de l'autre. Prenons pour exemple deux locomotives pesant l'une 70 et l'autre 85 t. avec leur tender, remorquant un train exigeant un effort de traction de 1 500 kg. Prenons

pour r une valeur moyenne de 12 kg. et supposons que le train monte une rampe de 5 mm.

L'effort F_c exercé au crochet de traction sera dans les deux cas de 1 500 kg. et l'effort nécessaire pour déplacer la machine sera, dans le premier cas, de 70 (12 + 5) = 1 190 kg. et, dans le second cas, de 85 (12 + 5) = 1 445 kg. L'effort à la jante sera respectivement dans les deux cas considérés de 1 190 + 1 500 kg. = 2 690 kg. et de 1 445 + 1 500 = 2 945 kg. Le rendement de la première locomotive sera

$$R'' = \frac{1500}{2690} = 0{,}559$$

et celui de la seconde de

$$R'' = \frac{1500}{2945} = 0{,}509$$

les deux rendements étant dans le rapport de $\frac{0{,}542}{0{,}588} = 0{,}910$, les deux machines seront d'un emploi aussi économique si la consommation de la seconde, par unité de puissance, est inférieure dans ce même rapport à la consommation de la première. Au delà, l'avantage restera à la machine lourde qui sera en outre plus facile à conduire et capable de mieux satisfaire aux exigences du service. A consommation égale et, d'autre part, en ce qui concerne l'utilisation du capital engagé, la machine légère fait preuve d'une supériorité marquée.

A ce point de vue, les habitudes des Compagnies américaines ne sont pas si critiquables qu'on pourrait le croire de prime abord. En poussant les chaudières de leurs locomotives dans une proportion inconnue chez nous, elles constatent, il est vrai, un rendement inférieur de la chaudière, mais le poids de la machine par unité de puissance se trouve réduit; une locomotive d'un poids donné peut remorquer des trains plus lourds ou plus rapides et ce que l'on perd sur le rendement thermique on le regagne sur l'utilisation de la machine considérée en tant que remorqueur. Finalement l'utilisation commerciale des machines est bonne puisque le nombre des kilomètres-machines se trouve réduit pour un tonnage kilométrique donné et que, d'autre part, la consommation de combustible, si elle est plus considérable par unité de poids d'eau vaporisée, est à peine supérieure par tonne-kilométrique remorquée à celle des locomotives européennes.

Le tender constituant un poids mort compris dans le second membre de l'équation précédente, on aura tout intérêt, au point de vue de l'utilisation, à lui donner la contenance minimum compatible avec les exigences du service. Le poids et la contenance des énormes tenders qui sont actuellement attelés aux locomotives des trains rapides contribuent à abaisser le rendement de ces dernières. On ne peut s'empêcher de trouver très rationnel le procédé employé par quelques Compagnies américaines et par un nombre sans cesse

croissant de lignes anglaises pour remédier à cet état de choses et qui consiste à effectuer en cours de route, au moyen des appareils Ramsbotton, le remplissage des tenders.

161. Comparaison avec d'autres moteurs. — Pour comparer en toute équité le rendement total de la locomotive à vapeur à celui des locomotives électriques par exemple, on doit, dans les deux cas, diviser le travail utile au crochet de traction par le travail indiqué sur les pistons, de la locomotive elle-même pour la première, de la machine motrice des génératrices pour les secondes.

Soient, pour les deux machines : T_i = travail indiqué sur les pistons et T_c = travail au crochet de traction. Soient pour la locomotive à vapeur, t t', respectivement, les travaux correspondant aux résistances passives du moteur et à la propulsion de la locomotive elle-même indépendamment de la résistance du mécanisme. Soient, pour la locomotive électrique, t_1 et t_1', désignant respectivement les mêmes travaux que t et t' ci-dessus; soient, en outre, t_1^{II}, t_1^{III}, t_1^{IV}, représentant respectivement les travaux correspondant aux pertes, entre le moteur et la génératrice, entre la génératrice et la réceptrice, entre la réceptrice et la jante.

La distribution des différents travaux sera comme suit :

Locomotive à vapeur :

$$T_c = T_i - (t + t');$$

Locomotive électrique :

$$T_c = T_i - (t_1 + t_1' + t_1^{II} + t_1^{III} + t_1^{IV}).$$

Or, pour que la locomotive électrique soit seulement aussi économique que la locomotive à vapeur, il faut ou que :

$$t_1 + t_1' = t + t' - (t_1^{II} + t_1^{III} + t_1^{IV}).$$

ou que le travail indiqué T_i soit plus considérable, pour une même quantité de combustible brûlée, dans la proportion des pertes supplémentaires.

Or, ces deux hypothèses semblent irréalisables; t et t_1, correspondant aux résistances passives du moteur, ne sauraient avoir des valeurs bien différentes; on gagnerait cependant un peu sur la résistance par tonne du véhicule. Le poids de la locomotive électrique, pour un travail donné, ne devant pas être inférieur à celui de la locomotive à vapeur (nous croyons même qu'il serait plus grand), il ne reste donc rien pour compenser les pertes supplémentaires qui peuvent être considérables.

D'autre part, la consommation de vapeur par cheval-indiqué, en *service*,

avec d'importantes variations de charge, ne saurait être très inférieure, pour les machines motrices des dynamos, à celle des locomotives à vapeur bien entretenues qui s'abaisse parfois, nous l'avons vu, à près de 1 kg.

Aussi, ne nous paraît-il pas douteux que la consommation de combustible par cheval-utile au crochet de traction ne doive être très nettement plus grande pour la locomotive électrique que pour la locomotive à vapeur dont la dépense se tient aux environs de 0,025 kg. de charbon par tonne-kilométrique transportée à la vitesse moyenne de 35 km. à l'heure.

162. Valeur économique de la locomotive exprimée par le chiffre de la dépense correspondant à l'unité de travail. — Les coefficients de rendement sont des nombres abstraits et relatifs qui ne renseignent pas sur l'utilisation économique absolue des locomotives, c'est-à-dire sur l'effet utile développé par ces machines pour une dépense déterminée. Dans la pratique courante, on évalue la consommation de combustible des machines par kilomètre, par train-kilomètre ou même par tonne-kilométrique. Ce système, qui se recommande en service par sa grande simplicité ou la facilité avec laquelle on peut opérer les relevés et qui permet de faire des comparaisons entre les machines consacrées, sur un même réseau, à un service analogue, manque de rigueur scientifique, nous l'avons dit, parce que le travail développé reste insuffisamment déterminé pour que l'on puisse étendre les comparaisons. Certaines conditions d'exploitation ou la nature du profil ont souvent plus d'effet sur ces consommations que les types particuliers de machines employés. Aussi a-t-on dû rechercher par des expériences spéciales quelle était la consommation des locomotives rapportée à une unité susceptible d'être mesurée avec certitude et de permettre des comparaisons assez étendues. On évalue le travail en *chevaux-indiqués*, ou en *chevaux-effectifs*, soit à la *jante des roues motrices*, soit au *crochet de traction*. La dépense s'évalue tantôt en kilogrammes de *vapeur*, tantôt en kilogrammes de *charbon*.

La consommation évaluée en vapeur élimine l'action de la chaudière et permet d'apprécier en eux-mêmes les différents modes d'utilisation de la vapeur ; il n'y a toutefois pas grand intérêt à ce point de vue à la séparer de la consommation de combustible, car tout système entraînant une économie de vapeur aura un retentissement sur le rendement de la chaudière, d'autant plus économique, entre certaines limites, qu'elle est moins forcée. Ce mode d'évaluation n'est pas toujours d'une exactitude absolue, car la quantité d'eau entraînée peut être très variable et, qu'on n'en tienne pas compte ou qu'on la déduise approximativement, on risque de commettre une erreur ; toutefois, ce renseignement est généralement suffisant pour les besoins de la pratique.

L'évaluation de la consommation en combustible brûlé embrasse l'ensemble des dépenses nécessitées pour la production du travail utile et toutes les

pertes, y compris celles qui ont leur siège dans la chaudière, et donne la mesure la plus complète de l'économie puisqu'elle permet de comparer les quantités totales d'énergies mises en jeu et recueillies ; mais elle peut aussi donner lieu à quelques incertitudes lorsqu'on compare les machines de réseaux différents en raison de la qualité variable des combustibles employés. Cette mesure n'aurait une rigueur suffisante que si l'on évaluait la dépense en calories, après analyse et essai du charbon. D'autre part, surtout sur de faibles parcours, on est plus facilement porté à commettre quelque erreur dans la mesure du combustible que dans celle de l'eau. Il est en effet difficile d'évaluer le poids de charbon qui se trouve sur la grille au commencement et à la fin de l'essai et, en tous cas, de conduire le feu de telle sorte que son état se trouve le même au début et à la fin de l'expérience ; encore la vérification de cette condition présente-t-elle quelque incertitude. Si la dépense est rapportée à la consommation d'eau, ces difficultés n'existent pas, car il suffit, la pression étant la même dans les deux cas, de ramener l'eau dans la chaudière, à la fin de l'expérience, au niveau même qu'elle occupait au début.

Ainsi, dans les différentes expériences effectuées en vue de déterminer l'utilisation économique des locomotives, on évalue la dépense sous une des six formes suivantes :

1° Dépense de vapeur par cheval-indiqué ;
2° — — cheval-effectif à la jante ;
3° — — cheval-effectif au crochet de traction ;
4° Dépense de combustible par cheval-indiqué ;
5° — — cheval-effectif à la jante ;
6° — — cheval-effectif au crochet de traction.

Nous donnons, dans le chapitre relatif à la vaporisation dans les chaudières locomotives, les résultats concernant leur rendement propre ; nous résumerons ci-après les résultats des expériences les plus connues effectuées en vue de déterminer l'utilisation totale ou partielle de la locomotive. Nous avons séparé les résultats concernant les machines compound et à simple expansion en les réunissant sous forme de tableaux facilitant les comparaisons.

DÉPENSE DE VAPEUR ET DE CHARBON PAR CHEVAL-EFFECTIF

		COMPAGNIE DE L'EST					COMPAGNIE DE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE				CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT		CHEMIN DE FER D'ORLÉANS		CALEDONIAN RY
		D'après MM. Vuillemin, Guebhart et Dieudonné			Essais de 1880	Essais de 1889	D'après M. G. Marié, 1880-1882			D'après M. Privat, 1895	D'après M. Desdouits.		D'après MM. Durand et Lencauchez.		D'après M.D. Drummond.
		Crampton.	Machines mixtes.	Machines à marchandises.	Machines express à 4 roues accouplées.	Machines-tenders de banlieue, à 6 roues accouplées.	Machines express à 4 roues accouplées.	Machines pour fortes rampes à 8 roues accouplées.	Machines à marchandises à 8 roues accouplées.	Machines express compound à 4 cylindres.	Machines express ordinaires.	Machines express à distribution Bonnefond.	Machines express ordinaires.	Machines express avec enveloppe et réchauffeur Lencauchez.	Machine express à 4 roues accouplées.
Dépense de vapeur brute par cheval-effectif.	au crochet de traction. kg.	16,56	22,35	15,50	»	12,5 à 14,7	»	»	»	16,6 à 18,4	»	»	14,28	12,27	8,28
	à la jante. kg.	»	»	»	»	»	»	»	11,72[2]	»	11,5	9,8	»	»	»
Dépense de charbon par cheval-effectif.	au crochet de traction. kg.	»	»	»	2,80 à 3,42	1,59 à 1,89	1,54 à 1,89	1,53	»	»	»	»	1,69	»	»
	à la jante. kg.	»	»	»	1,82 à 2,25	»	»	»	1,46	»	»	»	»	»	»

[1] Compris l'allumage. Moyenne de consommation des machines express du dépôt de Paris pour l'année 1880.
[2] Eau entraînée déduite.
[3] Vapeur sensible d'après les diagrammes.

DÉPENSE DE CHARBON ET DE VAPEUR PAR CHEVAL-INDIQUÉ

(A). *Machines à simple expansion.*

DÉSIGNATION DES MACHINES	COMPAGNIE DE L'EST 1880 Machines à 4 roues accouplées.	COMPAGNIE DE PARIS-LYONS-MÉDITERRANÉE 1880 Machines à 8 roues accouplées.	COMPAGNIE D'ORLÉANS 1885 Machines à 4 roues accouplées.		GREAT EASTERN 1887 Machines à 4 roues accouplées.	GREAT NORTHERN 1887 Machines à roues libres	L. AND S. W. RY 1891 Machines à 4 roues accouplées.	CINCINNATI, HAM. AND DAYTON 1878 Machines à 4 roues accouplées.	BALDWIN 1895 Machines à 4 roues accouplées.	PURDUE UNIVERSITY 1895 Machines à 4 roues accouplées.	LANCASHIRE AND YORKSHIRE 1896 Machines à 4 roues accouplées.	CHICAGO AND NORTH WESTERN 1896 Machines à 4 roues accouplées.	CALEDONIAN REY Machines à 4 roues accouplées.
			[2]	[3]									
Timbre de la chaudière. kg.	10	10	10	10	11,65	10,50	12,60	8,70	10,50	9,14	12,60	11,25	15,00
Consommation de vapeur par cheval-indiqué. kg.	»	»	12,27	14,28	13,61	»	9,07 à 10,43	13,60 à 15,15	»	11,90 à 14,00	11,02 à 12,01	14,20 à 15,10	5,78[4]
Consommation de combustible par chev.-indiqué kg.	1,16 à 1,28	1,29	1,02	»	1,29[1]	1,10[1]	1,04 à 1,17[1]	1,92 à 3,18[1]	1,60[1]	1,90 à 2,73[1]	1,13 à 1,29	1,80 à 2,43	»

[1] Non compris allumage.
[2] Avec enveloppe et réchauffeur.
[3] Sans enveloppe ni réchauffeur.
[4] Vapeur sensible d'après les diagrammes.

(B). *Machines compound.*

DÉSIGNATION DES MACHINES	COMPAGNIE DU NORD 1892 Machines à 4 roues accouplées.	COMPAGNIE DE PARIS-LYON MÉDITERRANÉE 1895 Machines à 4 roues accouplées.	S.-O. RUSSE Machine Mallet à 2 cylindres.	S.-O. RUSSE Machines à 4 cylindres.	NORTHERN PACIF. 1891 Machine Vauclain à 8 roues accouplées.	WESTERN N.-Y. 1892 Machine Vauclain à 4 roues accouplées.	ÉTAT AUTRICHIEN 1896 Machine Coldsdorf à 4 roues accouplées.
Timbre de la chaudière. . . . . kilogr.	14	15	12	14	11,25	12,65	»
Consommation de vapeur par cheval-indiqué . . . . . —	9,90 à 10,00	5,80 à 8,50[1]	10,40	9,00	10,44	10,75	9,45
Consommation de combustible par cheval-indiqué. . . . . —	1,25[2]	»	1,30[2]	1,12[2]	1,16	1,19	1,18[2]

[1] Vapeur sensible d'après les diagrammes.
[2] En supposant une vaporisation de 8 kg.

EXPÉRIENCES DE L'ÉTAT PRUSSIEN

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N°s des essais	NOMBRE d'essieux.	POIDS total du train. — T.	POIDS des voitures et des voyageurs. — T.	CHARBON brûlé pendant l'essai. — Kg.	EAU consommée pendant l'essai. — m³	TEMPS réel employé pour le parcours. — Minutes.	VITESSE moyenne. — Km. à l'heure.	RÉSISTANCE moyenne par tonne. — Kg.	EFFORT MOYEN du train entier. — Kg.	EFFORT MOYEN au crochet du tender. — Kg.	EFFORT moyen en chevaux à la circonférence de la roue motrice.	EAU vaporisée par kg. de charbon. — Kg.	CONSOMMATION de charbon. par cheval heure. — Kg.	CONSOMMATION de charbon. pour un effort de 1 000 000 de kilogm. au crochet du tender.
I. — Locomotive express, à quatre essieux, dont deux couplés. N° 25. Type n° 1.														
1	30	252	171	1 030	7,5	96	68	8,0	2016	1368	508	7,3	1,27	7,0
2	36	276	195	1 067	8,0	95	68	8,0	2208	1560	557	7,5	1,21	6,3
3	42	310	229	1 352	9,5	96	68	8,0	2480	1832	625	7,0	1,35	6,8
4	41	305	224	1 337	9,5	94	69	8,2	2501	1837	641	7,1	1,33	6,7
II. — Locomotive express, à trois essieux, dont deux couplés. N° 356. Type n° 7.														
5	30	234	164	849	5,2	94	69	8,2	1919	1345	491	6,1	1,11	5,8
6	36	269	199	1 061	7,0	95	68	8,0	2152	1592	542	6,6	1,24	6,2
7	36	266	196	1 026	7,0	95	68	8,0	2128	1568	536	6,8	1,21	6,1
III. — Locomotive express, compound, à quatre essieux, dont deux couplés. N° 37. Type n° 4.														
8	36	284	200	953	7,5	90	72	8,6	2442	1720	652	7,9	0,98	5,1
9	42	313	229	1 041	8,0	95	68	8,0	2504	1832	631	7,7	1,04	5,3
10	48	339	255	1 133	9,0	95	68	8,0	2712	2040	684	7,9	1,04	5,2
Locomotive express, compound, à quatre essieux, dont deux couplés. N° 47. Type n° 4.														
11	35	279	195	831	7,5	90	72	8,6	2399	1677	640	9,0	0,87	4,6
12	42	315	231	963	8,3	88	74	8,9	2804	2056	770	8,6	0,85	4,3
13	47	347	263	993	8,3	92	71	8,4	2915	2209	765	8,4	0,85	4,2
IV. — Locomotive à voyageurs, compound à trois essieux, dont deux couplés. N° 490. Type n° 8.														
14	30	236	167	881	6,4	90	72	8,6	2030	1436	542	7,3	1,08	5,7
15	36	279	210	976	7,4	89	73	8,7	2427	1827	657	7,6	1,00	4,8
16	42	304	235	956	7,8	96	68	8,0	2432	1880	613	8,2	0,98	4,7

OBSERVATIONS. — La rampe moyenne de la ligne est de 1 mm. par mètre. La consommation de charbon indiquée colonne 5 pour chaque essai, est obtenue en retranchant, de la quantité totale, 220 kg. pour l'allumage des machines à quatre essieux et 180 kg. pour celles à trois essieux. La résistance moyenne, colonne 9, est calculée au moyen de la formule $2,4 + \frac{V^2}{1000} + 1^k$. C'est à l'aide de cette formule qu'on a calculé les chiffres des colonnes 10 et 11.

ORGAN, juin 1893.

Le tableau précédent donne le résultat d'un certain nombre d'expériences faites en avril et mai 1893, sur les lignes de la direction de Hanovre (*Etat prussien*) dans le but de comparer la puissance des différents types de locomotives à grande vitesse. Ces essais ont été faits en remorquant le train n° 74 de Hanovre à Gœttingue, qui parcourt sans arrêt la distance 108 km., séparant ces deux villes. Chacun des types de locomotives servant aux essais était en bon état d'entretien et le charbon employé se composait de 2/3 de briquettes et de 1/3 de menu.

D'autre part, MM. von Borries et Blum, dans leur récent ouvrage[1], indiquent les chiffres suivants, comme résultant des essais de M. Lochner d'Erfurth :

Consommation d'eau et de charbon des locomotives.

VITESSE en kilomètres à l'heure.	PAR CHEVAL-INDIQUÉ ET PAR HEURE				PAR 1 000 KIL. D'EFFORT DE TRACTION AU CROCHET DU TENDER			
	Vapeur.		Charbon.		Vapeur.		Charbon.	
	Ordinaire.	Compound.	Ordinaire.	Compound.	Ordinaire.	Compound.	Ordinaire.	Compound.
	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.	Kg.
50	10	8,5	1,25	1,05	37	31,5	4,6	3,9
60	10,3	8,6	1,33	1,06	38	32	4,9	3,95
70	10,7	8,8	1,39	1,10	39,5	32,5	5,1	4,1
80	11,4	9,3	1,52	1,19	42	34,5	5,6	4,4
90	12,6	10,3	1,73	1,33	46,5	38	5,4	4,9

Ces consommations correspondent assez bien à celles qui résultent des autres expériences citées plus haut

Presque tous les essais indiquent un accroissement, léger il est vrai, de la consommation de vapeur par cheval-indiqué à mesure que la vitesse augmente, au delà tout au moins d'une certaine limite qui paraît varier suivant les types entre 40 et 60 km. à l'heure. Ce résultat paraît à première vue peu explicable. Il est naturel que la consommation de combustible s'accroisse à mesure que la production de la chaudière est plus active, ou que la dépense de vapeur par cheval effectif aille en augmentant avec la vitesse puisque le rendement diminue, mais il semblerait que le maximum d'économie, en ce qui concerne la consommation de vapeur par cheval-indiqué, devrait être obtenu lorsque la vitesse du piston est la plus grande et l'introduction la plus faible, le degré d'admission, dans la locomotive, étant d'autant

[1] Die Eisenbahn Technik der Gegenwart.

moindre, toutes choses égales d'ailleurs, que la vitesse est plus grande. Le résultat que nous signalons paraît devoir être attribué à une détente trop prolongée dans un cylindre unique; le refroidissement causé par le courant d'air ne semble pas intervenir puisque le fait a été également constaté sur les machines du *Chicago and North Western* essayées au point fixe, sur des galets munis de freins.

La locomotive, on le voit, est une machine plus économique que l'on est souvent porté à le croire ; elle dépense moins de charbon et de vapeur que la plupart des machines fixes sans condensation : de 1 kg. à 1,30 kg. de charbon et de 8 à 11 kg. au plus de vapeur par cheval-indiqué quand elle est convenablement construite et conduite[1]. Cette économie provient en grande partie des conditions mêmes qui lui imposent de développer une grande puissance sous un petit volume. La combustion y est très active et s'y produit à une haute température; elle s'effectue, lorsque les foyers sont bien disposés, d'une manière plus complète que dans la plupart des foyers appartenant à d'autres types de chaudières, et cependant la chaleur y est bien utilisée. Les hautes pressions, indispensables pour concilier la grande puissance et le faible volume, sont favorables à l'économie et les vitesses de pistons, qui sont très élevées dans les locomotives, améliorent l'utilisation de la vapeur en réduisant l'action des parois. Le grand volume donné aux cylindres en vue de l'effort maximum à produire au moment du démarrage, permet, avec le laminage de la vapeur dans les conduits d'admission, d'effectuer une détente suffisante.

Il reste bien quelques perfectionnements à réaliser, en vue de l'amélioration soit de la combustion, soit de l'utilisation de la vapeur, mais dont l'effet total, dans les meilleures conditions, par rapport aux résultats donnés par les locomotives perfectionnées, ne saurait guère dépasser de 15 à 20 0/0. Comme en outre leur effet sur l'économie est parfois douteux, tandis que la complication qu'ils entraînent est le plus souvent un fait réel, on comprend que beaucoup d'ingénieurs s'en tiennent au *statu quo* et redoutent avant tout d'enlever à la locomotive ce caractère de grande simplicité qui en est peut-être la qualité maîtresse.

D'ailleurs, on ne doit pas craindre de le répéter, la dépense de combustible ne doit pas être envisagée isolément. L'utilisation commerciale et financière de la machine, celle qui doit être finalement considérée par les intéressés, dépend aussi d'autres causes, indépendantes de la consommation de combustible ou même qui peuvent lui être inversement proportionnelles. Nous citions plus haut l'exemple des machines américaines dont la consommation

[1] En mettant à part les machines américaines qui sont moins économiques pour des raisons exposées ailleurs.

de combustible est exagérée, mais dont l'utilisation finale est bonne parce que, coûtant peu de premier achat et étant très forcées, elles représentent un capital à la fois peu considérable et très bien utilisé, le nombre des kilomètres-machines étant peu élevé par rapport à celui des tonnes-kilométriques.

Il est certain que certains dispositifs employés en vue d'épargner le combustible ne paient pas, par l'économie qu'ils procurent, l'intérêt du capital qu'ils représentent ou les frais d'entretien qu'ils entraînent.

163. Utilisation de la locomotive au point de vue du capital engagé et de la puissance qu'elle est capable de développer par unité de poids. — Il est une autre utilisation qu'il est intéressant d'étudier et que parfois on laisse trop dans l'ombre en accordant toute attention au rendement des machines ou à leur dépense de combustible, c'est l'utilisation financière ou utilisation du capital engagé. Nous ne pouvons ici entrer dans les considérations tendant à rechercher quel est le bénéfice final dérivé d'une modification ou d'un perfectionnement apporté à la machine, en tenant compte d'une part de la dépense supplémentaire à laquelle il a donné lieu, soit pour son établissement, soit pour son entretien, et du gain qu'il a permis de réaliser sur la dépense de combustible ou de graissage. C'est là une question des plus complexes que l'on ne saurait traiter complètement sans réunir un grand nombre de renseignements difficiles à recueillir. Nous nous contenterons de la signaler et d'examiner simplement quelle est en moyenne l'utilisation de la locomotive en ce qui concerne le capital qu'elle représente. On peut être ainsi amené à des comparaisons intéressantes avec d'autres machines ou d'autres systèmes de traction.

Comme on peut admettre en principe que toutes les locomotives des types ordinaires coûtent sensiblement le même prix au kilogramme, cette utilisation peut se ramener au quotient du travail indiqué ou effectif produit, par le poids total de la machine, c'est-à-dire *au poids par cheval.* La locomotive étant soumise à de très importantes variations de travail suivant les modifications de la charge, de la vitesse et du profil, il importe d'évaluer équitablement le travail moyen; nous choisirons la puissance maximum que la locomotive est capable de développer facilement d'une manière continue, et non la puissance maximum maximorum. Dans quelques cas, où il a été possible à la locomotive, le train n'étant pas soumis à des arrêts ou à des ralentissements d'exploitation répétés, de développer pendant tout un parcours une puissance voisine de son maximum, on peut faire choix de cette puissance.

Nous ferons cependant remarquer que la locomotive ne devant jamais, à cause des variations du profil, développer son travail maximum d'une

manière continue, mais devant être capable, pour accomplir son service, de produire un travail momentané souvent très considérable pour le passage de quelques points difficiles du réseau, il serait peut-être rationnel d'envisager cette puissance maximum plutôt que le travail moyen. Sur un réseau comportant des lignes faciles, sauf au passage d'un faîte, par exemple, le travail moyen peut rester faible, tandis que, surtout si on ne force pas la vitesse à la descente et qu'on la maintienne à un taux élevé sur les rampes, le travail maximum peut être considérable. Quelques rampes assez raides, situées sur une section unique du *North Eastern Railway*, entre Newcastle et Edimbourg, ont suffi par exemple pour contraindre la Compagnie à donner à son dernier type de machine express une grande puissance, très supérieure à celle qui est nécessaire pour le reste du réseau. Il en est ainsi, quoique peut-être à un moindre degré, pour tous les chemins de fer, aujourd'hui surtout que l'on cherche à accroître la vitesse moyenne en augmentant la vitesse à la montée des rampes.

Les machines express de construction récente sont capables de fournir un travail assez continu de 900 à 1100 chev.-indiqués sur les pistons ou de 700 à 850 chevaux au crochet de traction du tender et de développer momentanément jusqu'à 1 300 ou 1 400 chev.-indiqués. Nous avons sous les yeux les résultats d'essai d'une locomotive américaine, à grande vitesse, des plus puissantes, qui a développé aux essais jusqu'à 1 700 chev. sur les pistons.

En comptant sur le taux le plus bas de 50 kg. par unité de puissance, on est amené à constater que le capital d'établissement du cheval-vapeur développé à l'allure maximum par la locomotive seule ne dépasse pas 75 fr. [1]. Si on compte le tender, ce prix ne s'élève pas à 100 fr. C'est là un résultat des plus remarquables et qui tient à ce que la locomotive est à la fois très légère et, étant de construction simple et courante, peu coûteuse au kilogramme.

164. Limite de vitesse imposée à la locomotive. Poids des machines par unité de puissance. Augmentation réalisable de la puissance absolue et par unité de poids. — La question de la vitesse maximum que peuvent atteindre les locomotives, remorquant un train de poids donné ou sans charge, est intimement liée à la question de rendement. Cette vitesse maximum est entièrement subordonnée, non pas seulement à la puissance absolue de la machine, mais à sa puissance par unité de poids. Le travail absorbé par les résistances du moteur est en effet proportionnel à son poids, de sorte que pour aborder des vitesses de plus en plus grandes, il est nécessaire qu'une locomotive de poids donné puisse développer un travail de plus en plus considérable.

[1] En se basant sur le prix moyen de 1 fr. 50 le kilogramme.

C'est là d'ailleurs une loi générale qui s'applique aux moteurs de tous genres appelés à se déplacer, qu'ils soient montés sur roues ou à l'intérieur de navires, et aux animaux eux-mêmes.

La locomotive express doit être capable de développer, outre la puissance nécessaire à son propre déplacement, celle qui correspond à la traction du train. Le rendement diminue avec la vitesse, indépendamment de l'augmentation des résistances internes du moteur, parce que, à toute puissance maximum donnée développée au crochet de traction, correspond, sur un profil donné, une charge remorquée de plus en plus faible. Autrement dit, le poids de la machine étant une constante, le quotient P du travail employé à son propre déplacement par celui qui est nécessaire pour remorquer le train augmentera avec la vitesse. Ce quotient pourra être égal à 0,25 quand la locomotive remorquera à faible vitesse un train très lourd. Aux plus grandes vitesses actuellement réalisées par des trains réguliers, P devient égal à l'unité, le poids du train restant toutefois supérieur à celui de la machine et du tender parce que sa résistance par tonne est moindre ; enfin à la limite, P serait infini, et la machine ne pourrait plus que se remorquer elle-même, cette limite se trouvant toutes choses égales d'ailleurs plus ou moins reculée suivant que l'on considère le train en pente, en palier ou en rampe. On conçoit de suite que si l'on peut accroître la puissance de la machine sans modifier son poids, ou diminuer son poids sans réduire sa puissance, le quotient P passera par les mêmes valeurs à des vitesses croissantes, à mesure que cette réduction ou cette augmentation seront plus fortes.

La question de réduction de poids des locomotives offre déjà, dans les limites actuelles, un grand intérêt et son importance croîtra avec les vitesses.

Tant que l'on se bornera à des vitesses moyennes de marche assez modérées, de 70 à 80 km. à l'heure, on pourra se contenter d'augmenter la puissance absolue des machines afin qu'elles puissent remorquer, à ces mêmes vitesses, des trains plus lourds, mais la question change d'aspect dès que l'on veut aborder des vitessse notablement supérieures à celles qui sont réalisées aujourd'hui par les meilleurs trains.

La puissance maxima de la locomotive étant limitée par des questions de gabarit et d'emplacement, les charges remorquées doivent diminuer à mesure que les vitesses augmentent et, pour que le rendement reste satisfaisant, il faut que les machines soient légères. Des vitesses très supérieures à celles qui sont aujourd'hui regardées comme une limite pratique ne pourront être réalisées, si l'on veut remorquer des charges de quelque importance, que par des locomotives notablement plus légères par unité de puissance que ne le sont actuellement les meilleures locomotives. Celles-ci, suffisamment développées et renforcées, permettraient d'atteindre avec des trains de 150 tonnes

par exemple, des vitesses moyennes de marche de 110 km. à l'heure sur des lignes à profil facile. En augmentant encore les vitesses, on serait forcé de réduire de plus en plus la charge utile et la limite serait bientôt atteinte à laquelle la locomotive ne pourrait plus remorquer aucune charge, toute sa puissance étant employée à se remorquer elle-même.

On voit l'intérêt qui s'attache, au point de vue de l'accroissement futur des vitesses, à la réduction du poids des locomotives par unité de puissance. Hâtons-nous d'ailleurs d'ajouter que la locomotive a pu jusqu'ici rester à la hauteur des circonstances et se plier aux exigences toujours croissantes de l'exploitation, et que les vitesses actuellement atteintes sur beaucoup des meilleures lignes n'exigent pas encore d'elle son plus grand et dernier effort. On ne doit cependant pas se dissimuler que le problème devient plus ardu à mesure que les vitesses augmentent ; il est aujourd'hui beaucoup plus facile d'augmenter la puissance absolue des locomotives que leur puissance par unité de poids ; nous indiquerons plus loin, quels sont les perfectionnements qui, sous ce rapport, semblent encore réalisables. D'ailleurs, tout au moins sur les lignes à profil facile et pour le moment, la vitesse est plutôt limitée par des questions de tracé, de solidité des voies, d'exploitation (spécialement par l'accroissement du poids des trains), de dépense ou de sécurité, que par la capacité des machines.

Suffisamment perfectionnée à ce point de vue, la locomotive paraît susceptible de réunir la puissance et la légèreté nécessaires pour remorquer un jour les trains rapides à des vitesses notablement supérieures aux plus élevées de celles qui sont admises aujourd'hui sur les lignes à profil facile. La vitesse *moyenne* de 110 km. à l'heure, déjà obtenue à plusieurs reprises par quelques trains spéciaux, d'ailleurs légers, semble toutefois une limite difficile à atteindre d'une manière assez générale même dans l'avenir, en service courant, sur de longs trajets, et qui ne paraît pas de longtemps devoir être dépassée à moins d'un allégement considérable des trains. D'ailleurs, si les locomotives étaient en état de réaliser des vitesses moyennes plus grandes, on hésiterait pensons-nous, à les utiliser à leur pleine puissance sur la plupart des voies actuelles.

M. l'ingénieur en chef du Bousquet a, le premier croyons-nous, dans son discours d'installation comme président de la Société des Ingénieurs Civils, en 1894, traité cette intéressante question d'une manière complète et rigoureuse. Il a nettement montré, en basant le calcul sur des résistances par tonne déduites, pour des vitesses qui n'ont pas été atteintes encore, de résultats relevés entre 60 et 120 km. dans l'hypothèse que la courbe des résistances se continue d'une manière régulière [1] au delà des limites de

[1] Il n'est pas certain que la loi se continue, et il ne serait pas impossible que, au delà d'une certaine vitesse, la résistance par tonne cesse de s'accroître régulièrement. Bien que la com-

l'expérience actuelle, que quatre machines pesant respectivement : 100, 75, 50 et 35 kg. par cheval ne pourront pas dépasser, même ne remorquant aucune charge, *sur une rampe de* 5 *mm.*, les vitesses de : 132, 148, 175, 195 km. à l'heure. M. du Bousquet est arrivé aussi à ce résultat très intéressant qu'une locomotive, pesant 50 kg. par cheval, remorquant un train de 100 t. sur *une rampe de* 5 *mm.*, ne pourrait dépasser théoriquement une vitesse de 170 km. Encore, pour obtenir un tel résultat, faudrait-il que la machine fut en état de développer 38 000 chev. et pesât 1 900 t. Une vitesse de 180 km., dans les mêmes conditions, correspondrait à une puissance et à un poids infini du moteur. Pour obtenir une vitesse de 120 km. à l'heure sur la même rampe, le moteur devrait développer 1 333 chev. et peser environ 67 t. Ce serait la limite pratique des locomotives les plus puissantes et les plus légères existant actuellement ou que l'on est en état de construire dès maintenant. Une locomotive de 50 t., pouvant développer 1 440 chev., serait capable de monter une rampe de 5 mm. à la vitesse de 130 km. à l'heure avec un train de 100 t.

Les chiffres donnés par M. du Bousquet font bien ressortir l'influence, sur les vitesses réalisables, du poids par unité de puissance. Une locomotive pesant 100 kg. par cheval devrait développer 4 000 chev. et pèserait 400 t. pour monter la même rampe de 5 mm. avec le train-type de 100 t., tandis que des machines pesant respectivement 50 et 33 kg. par cheval devraient, pour effectuer le même service, développer la première 1 333 chev. (poids du moteur 67 t.) et la seconde 1 112 chev. (poids du moteur 37 t.).

Quoi qu'il en soit, l'expérience prouve que les machines express récentes sont capables, quand on les pousse suffisamment, de remonter en service, à la vitesse de 100 km. à l'heure, une rampe de 5 mm. avec une charge de 100 t. environ, sans qu'il soit nécessaire de considérer la chose comme un tour de force. Nous en donnerons seulement deux exemples. Une locomotive compound à quatre roues accouplées (type 1891) de la *Compagnie du Nord*, attelée à un train spécial de 95 t. (train de Calais à Paris du 12 juin 1896), a franchi la rampe de 3 à 4 mm., d'Amiens à Gannes à une vitesse moyenne de 96,6 km. à l'heure et celle de 5 mm. qui s'étend de Creil à Survilliers à la vitesse de 96,4 km. ; or, les nouvelles compounds du même réseau, celles des Compagnies du *Midi* et de l'*Ouest* sont plus puissantes et pourraient remorquer, soit à la même vitesse, soit à

paraison ne soit peut-être pas très juste, on ne peut s'empêcher de faire remarquer que les récents essais de torpilleurs ont démontré que, pour des vitesses supérieures à 28 nœuds environ, la résistance des carènes cessait de s'accroître suivant la loi établie pour les vitesses antérieurement atteintes.

une vitesse un peu plus grande, sur les mêmes rampes, des trains notablement plus lourds. Les locomotives express du *Caledonian Ry*, du type *Dunalastair*, font le service du train qui est à l'heure actuelle le plus rapide du monde bien que la ligne soit d'un profil peu facile. Le trajet de Perth à Forfar (52,3 km.) est accompli en 32 minutes, soit à la vitesse moyenne de 98 km. Le poids des trains varie entre 100 et 110 t. et la ligne comporte des rampes de 5 à 8 mm., de 11 km. de longueur ; on gagne même parfois une à deux minutes sur le parcours. Avec une charge de 210 t., ces locomotives accomplissent le même parcours à la vitesse moyenne de 86,4 km.

Afin d'augmenter la vitesse de trains de poids donné, on devra, soit réduire les résistances ou accroître la puissance de la machine, absolue et par unité de poids, soit agir à la fois sur ces deux éléments ; en augmentant seulement la puissance absolue de la locomotive, son poids suivant la même marche ascendante, on arriverait à remorquer des trains plus lourds, mais on ne pourrait reculer les limites de la vitesse maxima.

Le problème revient donc à diminuer la résistance des voitures, celle de la machine et à réduire le poids du moteur si on n'augmente pas sa puissance ou à augmenter sa puissance si on ne réduit pas son poids.

La résistance opposée par les véhicules se compose de deux facteurs résultant l'un des résistances passives, frottement de roulement, frottement des fusées, résistance de l'air, l'autre de l'action positive ou négative de la pesanteur sur les rampes ou sur les pentes, invariable pour une inclinaison donnée et exactement égale à 1 kg. par tonne et par millimètre d'inclinaison. La résistance due au frottement, identique à de mêmes vitesses en rampe ou en palier, peut être réduite par un meilleur graissage, par une disposition plus favorable des coussinets et par un choix spécial des matériaux qui les composent. On pourra peut-être un jour trouver dans les coussinets à billes, mal adaptés jusqu'ici au service des chemins de fer, un moyen de réduire beaucoup cette résistance. Enfin, les très bonnes voies, rigides et indéformables, ont pour effet de diminuer les résistances des véhicules en supprimant des chocs et des perturbations qui absorbent une notable partie du travail.

On réduit la résistance de l'air en composant les trains de voitures présentant une hauteur et une largeur uniformes, et offrant entre elles des vides de peu de longueur, en évitant les saillies extérieures, en un mot en donnant aux trains la forme d'un parallèlipipède régulier à peu près continu. C'est là une question dont l'importance, que les Anglais ont depuis longtemps comprise, augmente avec la vitesse et à laquelle on s'attache plus qu'autrefois.

La résistance des machines peut être atténuée par un ajustage et un montage soignés, par la réduction de tous les organes en mouvement qui ne sont

pas strictement utiles, en assurant l'équilibre des moments moteurs, par l'emploi de segments de piston et de garnitures de tiges de pistons et de tiroirs douces et élastiques, condition qui est loin d'être encore généralement réalisée, par l'adoption de tiroirs équilibrés, en accouplant le minimum d'essieux ou même en n'en accouplant pas du tout.

L'augmentation de la puissance absolue des machines revient à celle de la capacité de leurs chaudières. Il est toujours facile d'accroître à volonté le volume des cylindres et d'établir en proportion la section des organes, mais l'accroissement de la puissance des chaudières est loin d'être aussi facilement réalisable, quoique l'on soit encore assez loin, du moins en Europe, de la limite extrême que la surélévation de plus en plus générale des chaudières a reculé bien au delà de ce qui paraissait autrefois possible. Nous avons examiné, dans le chapitre relatif à la vaporisation des chaudières, les procédés permettant d'augmenter les surfaces de grille et de chauffe et donné quelques exemples des résultats obtenus ; nous n'avons pas à y revenir ici.

On peut réaliser l'augmentation de puissance par unité de poids en agissant d'abord sur les poids pour les réduire au minimum possible, puis en ayant recours à des procédés propres à accroître la puissance de la chaudière. On ne saurait escompter une réduction considérable du poids des locomotives en se basant sur les progrès accomplis à ce point de vue depuis une quinzaine d'années par les machines marines, dont le poids a dû passer de 150 ou 200 kg. à 35 kg. par cheval, pour se plier aux exigences de vitesse et permettre la construction de torpilleurs filant jusqu'à 31 nœuds. La locomotive, dès le début, s'est trouvée une machine très légère à tel point que le progrès a consisté, pour les appareils de navigation dont nous venons de parler, à s'en rapprocher à divers points de vue.

Le tableau ci-dessous donne le poids de quelques locomotives express et leur puissance relevée en service dans des conditions normales.

On ne doit pas perdre de vue que nous ne donnons pas ces chiffres pour établir, entre les différentes machines visées, une comparaison qui serait fort peu équitable puisqu'elles n'ont pas toutes été essayées dans les mêmes conditions. Certaines d'entre elles ont été beaucoup plus poussées que d'autres qui n'ont pas donné tout ce dont elles sont susceptibles. En outre, certaines des puissances relatées dans le tableau sont des moyennes de tout un voyage, certaines autres des moyennes seulement relevées pendant un parcours plus ou moins long (mais non des maxima cependant). Les données de ce tableau n'ont d'autre but que de fixer les idées et de citer des résultats obtenus en service.

On peut considérer que la locomotive est capable de développer quand on la pousse suffisamment, mais sans exagération, 20 chev.-indiqués par tonne de son propre poids, ce qui correspond à un poids de 50 kg. par

POIDS DE QUELQUES LOCOMOTIVES PAR CHEVAL-INDIQUÉ ET EFFECTIF

	PARIS-ORLÉANS Locomotive express à 4 roues accouplées. N° 398.	EST Locomotive-tender de banlieue à 6 roues accouplées.	NORD Locomotive express compound à 4 cylindres. N° 2123.	PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE Locomotive express compound à 4 cylindres.	OUEST Machine express à bogie. N° 978.	LONDON BRIGHTON Locomotive express à 4 roues accouplées à l'avant (Type Gladstone).	CALEDONIAN Locomotive express à bogie.	LONDON AND SOUTH WESTERN Locomotive express à bogie.	GREAT NORTHERN Locomotive à roues libres et à 3 essieux.	BALDWIN Machine express à bogie.	PURDUE UNIVERSITY Machine express à bogie (au point fixe).	ÉTAT AUTRICHIEN Machine express compound à bogie (système Gölsdorf).
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Poids de la machine en service . . . . . kg.	46 690	55 662	47 800	50 600	46 400	39 000	45 700	48 980	40 420	46 500	38 250	56 000
Poids du tender . . . . . kg.	25 000	»	33 780	36 000	24 800	27 600	30 500	34 000	40 930	30 000	»	38 000
Poids total machine et tender kg.	71 690	55 662	81 580	86 600	71 200	66 600	76 200	82 980	81 350	76 500	»	94 000
Puissance développée. indiquée. chev.	574,3	760	»	1 200	575	660	1 085	804	740	733	501	1 000
Puissance développée. effective au crochet ou à la jante . chev.	344,6	411	A la jante 974	810	337	»	780	»	»	»	»	»
Poids par unité de puissance, tender compris et non compris. par cheval-indiqué. . kg.	Sans tender 81,3 / Avec tender 124,9	73,2	»	Sans tender 42,1 / Avec tender 72,2	Sans tender 80,6 / Avec tender 123,8	Sans tender 59,0 / Avec tender 100,0	Sans tender 41,5 / Avec tender 69,2	Sans tender 81,2 / Avec tender 103,2	Sans tender 54,6 / Avec tender 103,9	Sans tender 63,4 / Avec tender 104,3	» / 76,5	Sans tender 56 / Avec tender 94
Poids par unité de puissance, tender compris et non compris. par cheval au crochet ou à la jante . kg.	Sans tender 135,3 / Avec tender 207,8	135,4	A la jante S. tender 49,00 / Av. tender 83,8	Sans tender 62,4 / Avec tender 107,0	Sans tender 123,8 / Avec tender 211,3	» / »	Sans tender 58,5 / Avec tender 97,5	» / »	» / »	» / »	» / »	» / »

NOTA. — La plupart de ces locomotives étaient plus ou moins loin de leur limite de puissance, particulièrement celles des colonnes : 1, 5 et 6 ; ces locomotives sont capables de développer plus de 1 000 chev.-indiqués.

cheval. Si on ajoute le poids du tender, on obtient des chiffres assez différents suivant les types considérés, la capacité du tender dépendant non seulement de la puissance de la machine mais aussi de la longueur des parcours effectuées sans arrêt. Ainsi le poids du tender, donné dans la colonne 9 est légèrement supérieur à celui de la locomotive, tandis que pour celui des colonnes 1 et 5 n'est que les 0,53 du poids de la machine. Des locomotives de même puissance peuvent avoir des tenders de poids très variable soit qu'elles effectuent des parcours sans arrêt, de longueur très différente, soit que certaines puissent s'alimenter en cours de route grâce aux appareils Ramsbotton. Il convient donc d'éliminer le poids du tender, variable indépendante, ce qui donne des chiffres un peu fictifs, il est vrai, mais permettant d'effectuer des comparaisons et d'apprécier la valeur de telle ou telle disposition.

La locomotive, pesant en moyenne 50 kg. (eau de la chaudière comprise), par cheval, sans son tender, quand elle est convenablement poussée, peut donc être considérée comme une machine extrêmement légère surtout si l'on remarque qu'elle est montée sur un véhicule et comporte des accessoires augmentant son poids d'environ un tiers. Elle est encore, croyons-nous, susceptible de quelques perfectionnements à ce point de vue. En effet, les machines de torpilleurs qui pourtant sont à condensation par surface et comportent un grand nombre d'appareils inconnus dans les chemins de fer et un tuyautage des plus complexes ne pèsent, même quand elles sont alimentées par des chaudières locomotives, que 35 kg. par cheval environ, compris l'eau des chaudières et du condenseur. On peut admettre que le poids des lignes d'arbres et des hélices correspond sensiblement à celui des roues et des essieux de la locomotive ; mais, d'autre part, le bâti est beaucoup plus léger.

L'infériorité de la locomotive au point de vue du poids provient des causes suivantes :

Elle consomme un peu plus de vapeur par unité de puissance et exige par conséquent une plus grande chaudière ; toutefois, ce défaut est en grande partie atténué par le tirage plus intense, la chaudière produisant plus par mètre carré de grille que celles des torpilleurs.

Elle tourne moins vite. Le nombre de tours d'une machine express ayant des roues de 2,00 m. de diamètre et marchant à raison de 80 km. à l'heure n'est que de 212 par minute, tandis que les appareils de torpilleurs tournent fréquemment à 350 et 400 tours pour la marche à outrance. Il semble donc en résulter que l'on aurait avantage, au point de vue de la diminution de poids, à donner aux roues motrices un diamètre plus faible que celui qui est usuellement adopté, ces roues étant elles-mêmes plus légères et nécessitant, pour fournir une vitesse donnée, un nombre de tours plus élevé. Toute-

fois, cette mesure n'est pas à recommander parce qu'elle tend à diminuer le rendement mécanique, favorise l'usure et entraîne de plus grandes perturbations.

La locomotive étant soumise à un service très dur, à des chocs violents et répétés, étant par la nature même de son service conduite avec moins de précaution et de soins, ses organes doivent être plus robustes que ceux des machines de torpilleurs qui, on ne doit pas l'oublier, ne sauraient à beaucoup près fournir leur travail maximum d'une manière aussi suivie que la locomotive.

En ce qui concerne le véhicule, la réduction de poids ne semble pas en général s'accorder avec l'augmentation des vitesses qui, entraînant des réactions plus violentes sur la voie et des effets destructeurs, nécessite parfois au contraire un renforcement des organes, l'addition de bogies ou de bissels. Il semble, à beaucoup de points de vue, difficile d'aller plus loin dans cette voie. Certaines machines modernes sont plutôt un peu faibles d'échantillons; les roues et les longerons cassés ou fendus en service ne sont pas rares. Les Américains ont gagné près de trois tonnes sur leurs machines en remplaçant les roues en fonte par des roues en acier moulé ou en fer forgé, mais nous n'avons pas cette ressource.

La section des organes du mécanisme ne peut être diminuée sans danger surtout en raison du service de plus en plus rude et des vitesses sans cesse croissantes que l'on demande aux locomotives.

En ce qui concerne la chaudière, l'accroissement des pressions, si en vogue actuellement, exigeant des tôles de plus en plus épaisses, ne semble pas non plus de ce côté favorable à la diminution du poids. Cependant on a réduit depuis quelques années le poids des chaudières par unité de puissance produite, en diminuant la longueur des tubes et du corps cylindrique et le volume d'eau qu'il contient, en adoptant des tubes Serve et des foyers en acier, en diminuant le diamètre et la hauteur des dômes. L'adoption des foyers en briques réfractaires permettrait peut-être aussi de gagner un peu de poids. L'épaisseur des tôles, ordinairement augmentée au delà de ce que nécessite la résistance en vue de prolonger la durée des chaudières, pourrait peut-être se trouver réduite dans les machines appelées à un service ultra-rapide. Les chaudières des machines anglaises et américaines ont, toutes choses égales d'ailleurs, des tôles plus minces que les nôtres. L'emploi de l'acier a permis aussi une légère diminution de poids et peut-être la métallurgie sera-t-elle en état de livrer dans l'avenir, à un prix abordable, des tôles de plus grande ténacité.

On peut aussi compter sur une légère réduction de poids, en étudiant avec un soin particulier et en vue de cet objet spécial les organes accessoires et en établissant les machines suivant les types les plus ramassés et dispensant

de tous les dispositifs exigeant l'emploi de lests ou d'organes susceptibles d'accroître le poids mort.

Entre une machine express étudiée spécialement au point de vue de la réduction du poids et une locomotive de même puissance bien établie, mais dans la construction de laquelle on ne s'est pas attaché particulièrement à cette question, on peut relever une différence de poids de 3 à 4 t. Mais les progrès à accomplir de ce côté ont été réalisés pour la plupart dans les types récents de locomotive, et, à part l'emploi des foyers en acier et la réduction d'épaisseur des tôles de chaudières, on ne voit pas trop de quel côté pourront se porter les efforts des constructeurs futurs.

Le poids du tender s'ajoute à celui de la machine et tend à accroître le poids mort de l'ensemble d'une manière surtout marquée pour les services où il conviendrait particulièrement de le réduire, c'est-à-dire pour les services à grande vitesse qui comportent d'ordinaire des arrêts très espacés exigeant des approvisionnements d'eau considérables, jusqu'à 20 t. pour certains tenders récents. Il existe à cet état de choses un remède auquel on sera peut-être amené à recourir en France un jour et qui consiste dans l'emploi des appareils Ramsbottom, usités par un certain nombre de lignes anglaises et américaines et qui permettent de faire le remplissage des tenders en cours de route. On peut ainsi effectuer des parcours de 300 km. sans arrêt, avec des tenders contenant 10 à 11 t. d'eau seulement.

L'augmentation de la puissance absolue des locomotives est très possible, nous l'avons vu, dans d'assez larges limites, sous la condition de relever suffisamment les chaudières pour rendre leurs dimensions transversales indépendantes de l'écartement des bandages. Jusqu'à un certain point, cet accroissement absolu peut être considéré comme entraînant une diminution du poids par unité de puissance, quelques-uns des facteurs étant constants — une chaudière de 1 600 chev. ne pèserait pas deux fois plus qu'une chaudière de 800 chev. —, mais il ne donne pas une solution complète. Il est certain qu'à égalité de vaporisation par unité de surface, les locomotives pèsent d'autant moins par cheval, lorsqu'elles développent toute leur puissance, que leur chaudière constitue une plus grande fraction du poids total. On peut accroître très notablement la puissance d'une locomotive sans augmenter proportionnellement son poids, en remplaçant sa chaudière par une autre plus forte ; c'est ce qui se fait tous les jours en pratique lorsque d'anciennes machines reviennent à l'atelier en grande réparation, nécessitant le remplacement de la chaudière ; on les met ainsi à peu de frais à la hauteur des exigences croissantes de l'exploitation, sans occasionner une surcharge excessive des essieux, ni surtout une fatigue anormale des organes du mécanisme. En effet, l'accroissement de l'activité de la chaudière n'entraîne

pas une augmentation de l'effort maximum sur les pistons, qui dépend de la pression et de la section des cylindres; il permet simplement, sans que jamais les efforts sur les bielles soient aussi grands qu'au moment du démarrage, de développer en cours de route un travail plus élevé et plus soutenu, autrement dit, d'utiliser à des vitesses plus grandes une fraction donnée de l'adhérence, ou, à de mêmes vitesses, une plus grande fraction de cette adhérence. La plus grande légèreté relative des machines modernes provient avant tout de l'augmentation de leurs surfaces de grille et de chauffe, les poids morts n'ayant pas subi la même progression.

Pour accroître la puissance par unité de poids d'un type donné de machine, il faut, après avoir pris les dispositions nécessaires pour supprimer tous les poids inutiles, ou augmenter la production de vapeur par mètre carré de surface de chauffe ou accroître l'effet utile de la vapeur.

Il paraît difficile de pousser la vaporisation plus loin qu'on ne le fait actuellement avec certains types de locomotives, à moins de diminuer notablement l'utilisation de leur chaudière. Toutes cependant ne sont pas également poussées, et certaines pourraient l'être plus encore avec avantage. L'emploi, coûteux mais parfois avantageux pour les locomotives express, de charbons de très bonne qualité susceptibles d'être brûlés en couche épaisse, paraît le procédé le plus simple et le plus facilement réalisable d'accroître la production des chaudières. A ce point de vue, le pétrole serait aussi très avantageux; il permettrait, comme l'ont montré les essais effectués sur des chaudières de bâtiments à grande vitesse, de pousser la vaporisation jusqu'à 90 kg. par mètre carré moyen de surface de chauffe et, par conséquent, à une locomotive possédant une surface de chauffe, de 150 m², de développer normalement 1 400 chev.-indiqués. Malheureusement son emploi est actuellement beaucoup trop dispendieux, en France tout au moins, pour permettre son emploi d'une manière courante.

Il ne suffit pas d'accroître la surface de grille ou la quantité de combustible brûlé par unité de temps, il faut que la surface de chauffe suive la même progression pour permettre une bonne utilisation du calorique, et cela ne sera pas toujours possible à cause de la limite de poids total ou par essieu. Il est en effet tout différent d'augmenter la surface de grille pour produire plus de vapeur, comme nous le supposons ici, ou pour utiliser des combustibles menus ou inférieurs, comme cela a été réalisé sur les machines belges et américaines dont nous avons parlé. La quantité de charbon brûlée n'augmentant pas dans ce dernier cas, on n'a pas à augmenter la surface de chauffe totale.

Sans condamner la chaudière locomotive, si économique et qui a fait ses preuves, on peut être cependant amené à examiner si elle constitue une solution définitive et immuable. Les chaudières multitubulaires, dérivées

du générateur du Temple, composées de tubes de faible diamètre à l'intérieur desquels circule l'eau, ont fait preuve dans la marine — elles sont à peu près uniquement employées pour les torpilleurs et les petits bâtiments à grande vitesse, et l'on commence à en étendre l'usage à des navires d'autres catégories — d'une certaine supériorité sur la chaudière locomotive à laquelle, du reste, on avait dû faire subir, pour la loger à bord, des modifications peu favorables à son bon fonctionnement. Elles paraissent, en tout cas, notablement plus légères comme l'indique le tableau suivant, bien que l'activité de la combustion soit ordinairement poussée moins loin que sur les locomotives.

Poids par mètre carré de grille et par cheval-indiqué de la chaudière locomotive et des chaudières multitubulaires à petits tubes.

(Eau comprise.)

	POIDS par mètre carré de grille.	POIDS par cheval, d'après essais[1].
	Kilogr.	Kilogr.
Chaudière locomotive (moyenne)	6 000 à 8 000	11 à 14
— Thornycroft	3 200	8
— Normand	4 600	10
— Yarrow	2 860	6,3

[1] Production maximum.

On voit que les générateurs multitubulaires sont beaucoup plus légers, si l'on rapporte leur poids à l'unité de surface de grille, et cela dans la proportion de 1 à 2 environ. Cet avantage disparaît en grande partie si l'on rapporte les poids à la puissance développée ou, ce qui revient au même, à la quantité de vapeur produite. Ce fait tient à ce que les foyers de locomotives, tout au moins lorsqu'ils sont munis d'une voûte en briques et sont suffisamment profonds, se trouvent mieux disposés que ceux des générateurs aquatubulaires en vue d'une combustion intense ; on y brûle couramment de 500 à 600 kg. de charbon par heure et par mètre carré de grille au lieu de 250 à 400 kg. au maximum. Encore, si les locomotives sont chauffées avec des qualités de charbons, en gros morceaux, analogues à celles que l'on emploie sur les torpilleurs, atteint-on parfois des combustion de 800 à 1000 kg. par heure et par mètre carré de grille (machines anglaises; locomotives américaines brûlant des houilles bitumineuses).

Et cependant, même au point de vue du poids par cheval, la chaudière

multitubulaire garde un avantage marqué, moindre d'ailleurs qu'il ne paraît ressortir de l'examen du tableau précédent.

Les puissances données pour les générateurs aquatubulaires sont en effet relevées sur des machines à triple expansion et à condensation, plus économiques que la locomotive; de sorte que la chaudière Yarrow par exemple, alimentant une locomotive ordinaire à cylindres égaux pèserait non plus 6,3 kg., mais au moins 7,5 kg. par cheval.

La plus grande légèreté de la chaudière multitubulaire paraît provenir des causes suivantes :

1° Moindre volume d'eau à l'intérieur de la chaudière ;

2° Suppression des parties planes nécessitant de lourdes armatures ;

3° Meilleure circulation.

Ces chaudières ont en outre l'avantage de se prêter, mieux que tout autre, à un accroissement considérable des pressions, grâce au petit diamètre de leurs réservoirs et de leurs tubes. Par leur forme toutefois, elles s'adaptent mal à la locomotive, et c'est là peut-être la principale raison qui les a fait écarter jusqu'à ce jour pour ce genre d'application, mais cette difficulté n'est peut-être pas insurmontable. Il est possible que, dans l'avenir, on soit conduit à essayer cette application ne fût-ce que sous une forme mixte, un corps cylindrique de faible longueur complétant à l'avant la chaudière multitubulaire et permettant, à une allure très forcée, une meilleure utilisation du calorique. Ce sera peut-être la dernière ressource à laquelle on aura recours pour augmenter la puissance de la locomotive, lorsque sa chaudière du type classique aura atteint les dimensions limites que permettent la charge maximum par essieu ou les dimensions du gabarit.

On est en tout cas en droit d'affirmer que l'on n'obtiendra de résultats avantageux qu'en conservant au foyer de la locomotive la forme et les proportions usuelles, seules capables d'assurer une combustion satisfaisante avec les tirages les plus intenses, même dût-on constituer l'enveloppe de ce foyer, de faisceaux de petits tubes à eau très rapprochés, remplaçant les lames d'eau usuelles.

On peut rechercher l'amélioration de l'effet utile de la vapeur dans un des procédés sur lesquels nous nous sommes longuement étendus dans un autre chapitre : l'élévation des pressions, la surchauffe, l'enveloppe de vapeur, et le mode compound dont nous avons discuté les mérites relatifs. Au point de vue qui nous occupe ici, l'élévation des pressions, au delà des limites actuelles, ne paraît pas devoir donner une économie capable de compenser l'augmentation de poids résultant de la plus grande épaisseur qu'elle entraîne à donner aux tôles de la chaudière. L'enveloppe de vapeur et la surchauffe ne sont guère applicables, nous l'avons vu, et la première ne donne qu'une économie insignifiante dans son adaptation à la locomotive. Les distributions perfec-

tionnées ne peuvent améliorer l'utilisation que dans une très faible proportion, mais elles n'entraînent aucune augmentation de poids. Le système compound semble permettre de compter sur une économie de 15 à 20 p. 100 qui peut compenser et au delà l'accroissement de poids qu'il entraîne, d'ailleurs variable suivant le système adopté. Les machines marines les plus légères, si l'on fait entrer les chaudières en ligne de compte, sont celles où la détente est la plus fractionnée et poussée le plus loin, c'est-à-dire dans celles qui possèdent un plus grand nombre de cylindres et paraissent les plus lourdes de prime abord, et cela parce qu'elles permettent de gagner plus de poids par la réduction possible de la surface de chauffe, pour la production d'une puissance donnée, qu'elles n'en font perdre par l'augmentation du nombre des cylindres et des organes du mécanisme. Il doit en être de même du système compound pour les locomotives bien que l'expérience soit moins concluante en ce qui les concerne. Si toutefois on se reporte au tableau précédent, on reconnaîtra que ce sont les machines compound à quatre cylindres des *Compagnies du Nord* et de *Lyon* qui présentent le moindre poids par cheval-indiqué; si ce n'est pas là une simple coïncidence tenant à ce que les résultats concernant ces machines ont été relevés à une allure plus forcée, on pourra y voir une confirmation de l'hypothèse précédente. La locomotive compound de *Paris-Lyon-Méditerranée* a même développé, d'après la note de M. Privat[1], une puissance de 1 422 chev., pendant un court instant il est vrai, soit 35,6 kg. par cheval, ce qui est comparable aux résultats donnés par les machines de torpilleurs, mais il est douteux que cette machine eût été capable de produire une telle puissance autrement que pendant un temps assez court. Cela n'a d'ailleurs pas une grande importance, la locomotive ne devant développer son travail maximum que momentanément, sur quelques portions des grandes lignes qui le rendent nécessaire pour que la vitesse y soit maintenue au degré voulu. Faute de pouvoir produire un tel travail, ne fût-ce parfois que pendant quelques minutes, la locomotive ne serait pas à la hauteur de son service.

Si perfectionnée qu'elle soit, la locomotive paraît donc encore susceptible de quelques améliorations qui pourront permettre dans l'avenir de diminuer de 20 à 25 0/0 son poids par cheval. Il ne semble pas, que l'on puisse aller au delà, à moins de renoncer au type classique et d'employer un autre système de chaudière, de combiner par exemple l'emploi de la chaudière multitubulaire avec d'autres dispositions propres à accroître la production et à diminuer la dépense de vapeur par unité de travail produit. On arriverait peut-être ainsi au poids normal très réduit, par cheval, de 30 à 40 kg., comme dans les machines des torpilleurs.

C'est surtout en forçant davantage la production des chaudières et en

[1] *Revue générale des Chemins de fer*, mars 1896.

diminuant le poids des tenders et de leur approvisionnement que l'on peut espérer de résoudre le problème.

165. Conclusions. — La locomotive, ainsi que l'a très bien dit M. G. Richard, « cette machine, si étroitement emprisonnée entre tant de limitations rigoureuses — en poids, en volume, en forme — tous obstacles en apparence incompatibles avec son développement rationnel, est aussi très économique. Il suffirait à la rigueur, que la locomotive fut très puissante, rapide et sûre — ce sont ses conditions vitales, sa raison d'être — mais de plus, elle dépense moins que la plupart des machines sans condensation dont rien n'entrave le développement ». Son rendement mécanique total, en tant qu'appareil à vapeur et remorqueur, s'élève dans les meilleures conditions à 80 0/0 et n'est presque jamais inférieur à 50 0/0, et on pourra sans doute l'accroître dans la suite pour les machines à grande vitesse, soit en améliorant le mécanisme, soit en réduisant le poids par cheval de la machine et du tender ; en ce qui concerne la diminution de poids de ce dernier, l'emploi des appareils Ramsbottom sera peut-être un jour considéré comme aussi avantageux sur le Continent européen qu'en Angleterre et aux États-Unis.

La consommation de vapeur brute par *cheval-indiqué* peut descendre jusqu'à 8,50 kg. dans les locomotives les plus perfectionnées ; elle est très souvent de 9,5 à 10 kg. et ne s'élève qu'exceptionnellement au-dessus de 11 kg. C'est assurément un très beau résultat pour des machines sans condensation qui sont soumises à des variations de travail considérables et répétées.

De même, la consommation de charbon est peu élevée. Dans les machines brûlant d'excellent combustible, elle s'abaisse jusqu'à 1 kg. et dans la plupart des locomotives elle oscille entre 1,10 kg. et 1,30 kg. au plus, par *cheval-indiqué*.

En outre, la locomotive est une machine légère, simple et peu coûteuse. Elle peut, sans être forcée au delà de ce qui est raisonnable, développer environ 20 chevaux par tonne de son poids (tender non compris). Cela met le capital d'établissement du cheval-vapeur à 75 fr. environ, ce qui est extrêmement bas. On peut certainement objecter que la locomotive ne travaille pas d'une manière continue et ne peut développer cette puissance que momentanément ; comme la durée de son fonctionnement est réduite à quelques heures par jour, il faut plusieures locomotives pour assurer un service nécessitant seulement le travail qu'une seule pourrait accomplir si elle fonctionnait d'une manière continue. Nous répondrons que la durée du fonctionnement de la locomotive est réduite bien plus par la nécessité de ne pas imposer de surmenage aux hommes qui la conduisent que pour épargner ses propres organes. La double ou la triple équipe constituent un moyen de remédier à cet ordre de choses et les applications qui en ont été faites montrent

que la locomotive est susceptible de fournir des parcours beaucoup plus considérables qu'on ne le croyait autrefois ; si les Administrations de chemins de fer n'ont pas généralisé ce système, c'est qu'elles y ont vu des inconvénients d'ordre intérieur qui leur ont semblé contre-balancer le bénéfice obtenu de ce côté.

Il ne nous a pas paru hors de propos de rappeler ces quelques faits propres à rendre justice à la locomotive, cet admirable outil parfois méconnu, qui n'a jamais manqué de répondre aux exigences toujours croissantes du service et a su se développer sans cesse, au gré des besoins.

TROISIÈME PARTIE

PROPORTIONS, MODE DE CONSTRUCTION, DISPOSITIONS D'ENSEMBLE ET DE DÉTAIL DES ORGANES DE LA LOCOMOTIVE

CHAPITRE PREMIER

DESCRIPTION GÉNÉRALE ET PROPORTIONS DE LA CHAUDIÈRE LOCOMOTIVE

Description générale de la chaudière classique. — Types spéciaux de chaudières locomotives. — Position relative du foyer et des essieux. — Dimensions longitudinales et transversales maxima imposées aux boîtes à feu. — Procédés employés pour permettre l'élargissement des grilles. — Profondeur des foyers. — Limite imposée au diamètre du corps cylindrique et procédés usités pour la reculer. — Surfaces de grille et de chauffe. — Largeur des lames d'eau. — Faisceau tubulaire. — Formes et proportions des cheminées. — Volume d'eau et de vapeur.

166. La chaudière locomotive (fig. 298) appartient au type dit *tubulaire* et à *foyer intérieur*. Elle se compose essentiellement d'un *foyer* sensiblement rectangulaire d'où les produits de la combustion s'échappent, à travers un *faisceau de tubes* de petit diamètre, disposé horizontalement et aboutissant à l'intérieur d'une *boîte à fumée* que surmonte la *cheminée*. Le foyer est entouré par la *boîte à feu* qui en épouse à peu près la forme, laissant sur son pourtour des *lames d'eau* de faible épaisseur, et se raccorde par l'avant au *corps cylindrique*, lequel renferme le faisceau tubulaire. Le dessus du foyer ou *ciel*, disposé horizontalement ou à peu près, se trouve placé à une hauteur au-dessus de l'axe du corps cylindrique, sensiblement égale ou un peu inférieure au tiers du rayon du corps cylindrique; la rangée supérieure des tubes est naturellement un peu en contre-bas. De cette manière, quand l'eau atteint, dans la chaudière, son niveau normal (à une hauteur de 10 à 20 cm. au-dessus du ciel), il reste à la partie supérieure de la chaudière un espace libre, dont la section présente la forme d'un segment, qui forme la *chambre de vapeur*, au volume de laquelle vient ordinairement s'ajouter

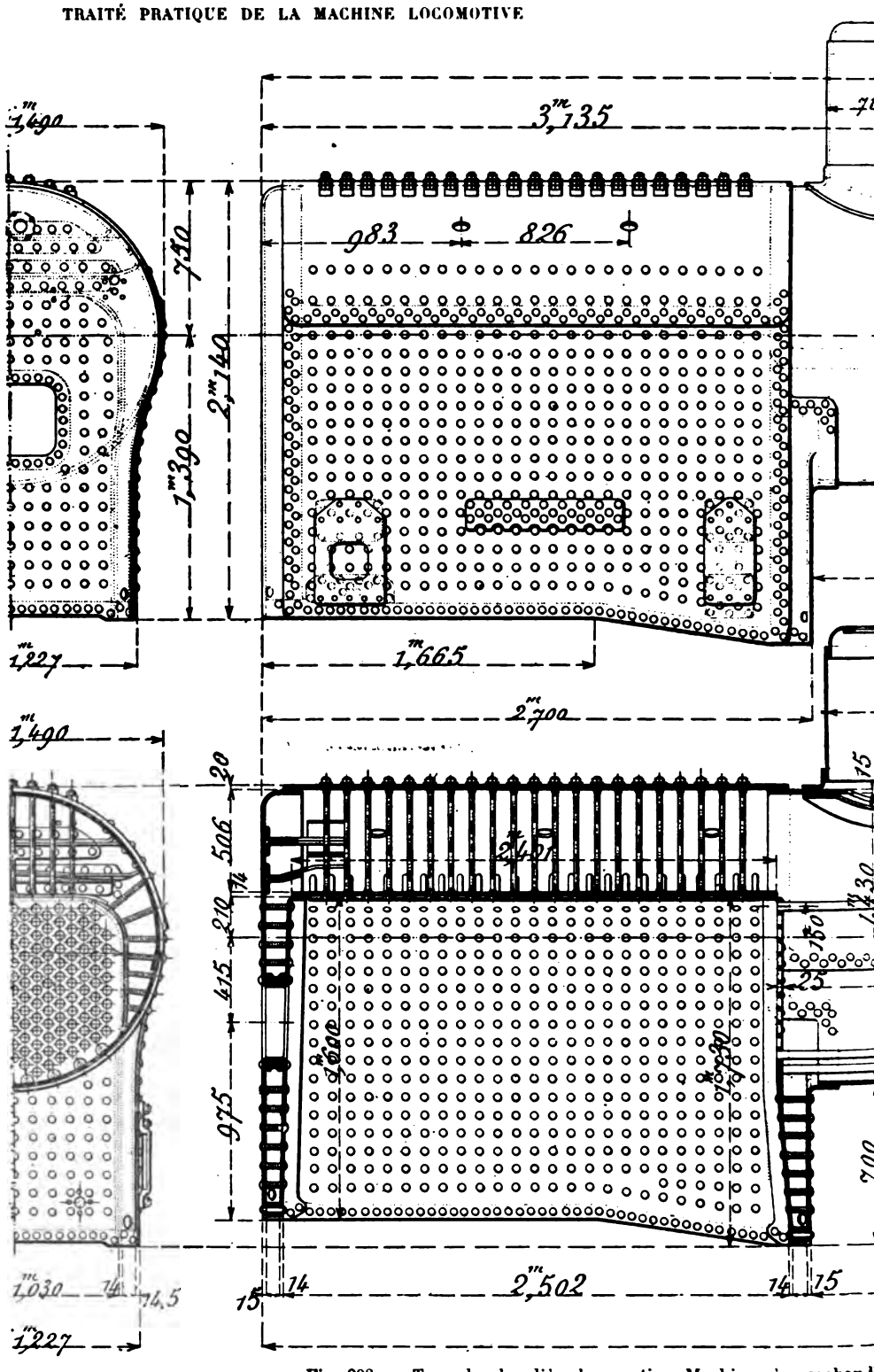
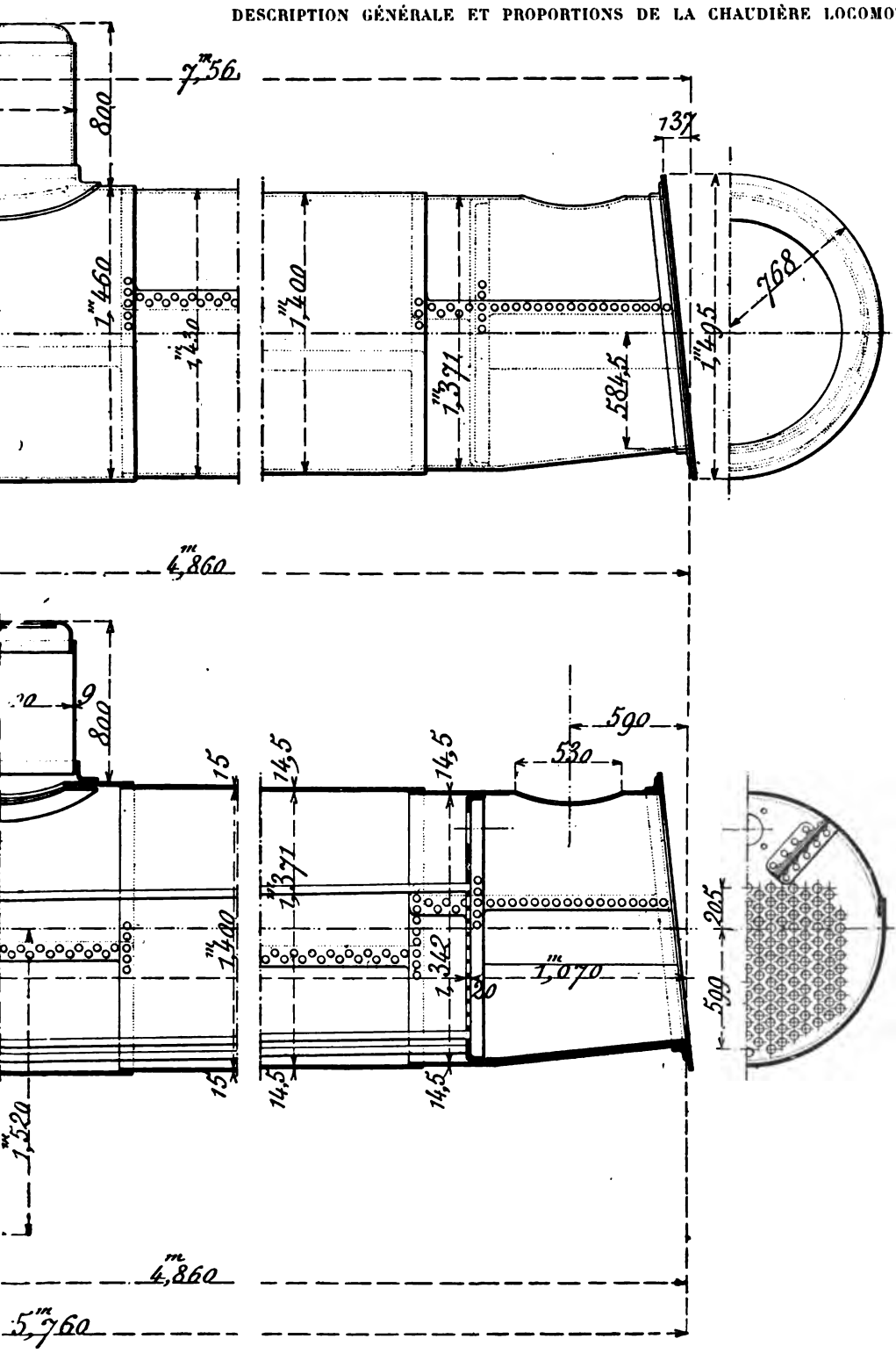


Fig. 298. — Type de chaudière locomotive. Machines à marchand



à six roues accouplées (série 1000-1005) des *Chemins de fer de l'Est.*

celui du *dôme* monté sur la boîte à feu ou plus ordinairement sur le corps cylindrique.

Le foyer est constitué par deux parois latérales appelées *côtés* ou *flancs* ordinairement formées par le prolongement, après cintrage, de la plaque formant le *ciel;* par une *plaque arrière* percée vers son milieu d'une ouverture correspondant à la porte; et par une *plaque avant* dont la plus grande portion située au-dessus du plan tangent à la génératrice inférieure du corps cylindrique, d'une épaisseur un peu plus grande, remplit l'office de *plaque tubulaire.*

L'enveloppe du foyer, assez improprement appelé *boîte à feu*, se compose : d'une tôle, continue ou en trois pièces, appelée *berceau*, dont les parties latérales sont verticales et sensiblement parallèles aux côtés du foyer et dont la partie haute, s'écartant davantage du foyer, continue au-dessus du *ciel* les parois du corps cylindrique; d'une face verticale et postérieure limitant la chaudière vers l'arrière, appelée *plaque arrière*, et d'une autre plaque verticale à l'*avant*, fermant la chaudière de ce côté et reliant la boîte à feu au corps cylindrique, suivant toute la circonférence ou seulement à la partie basse, selon le mode de construction adopté, comme nous le verrons.

Les différentes parties de la boîte à feu sont assemblées entre elles et avec le corps cylindrique par des *pinces* droites ou relevées, soigneusement dressées et jointes, reliées au moyen de *rivets;* avec les parois du foyer par un *cadre* en fer forgé, rectangulaire, placé suivant le contour du foyer à la partie inférieure, interposé entre les plaques à relier et traversé, en même temps que celle-ci, par de longs rivets; par un second cadre de même forme délimitant l'ouverture de la porte, et par un système assez complexe d'*entretoises* et d'*armatures.*

Les parois du foyer, qui sont planes, ne présentent par elles-mêmes qu'une résistance insignifiante à la pression qu'exerce la vapeur sur leurs faces extérieures.

On assure l'indéformabilité des plaques verticales à l'aide d'entretoises rapprochées qui les relient aux parois voisines et sensiblement parallèles de l'enveloppe de boîte à feu, pressées en sens opposés par la vapeur.

La partie de la plaque avant formant plaque tubulaire est consolidée par les tubes qui, jouant à proprement parler le rôle d'entretoises, la relient à la plaque avant et par une rangée de tirants placés au-dessous des tubes les plus bas sur la virole arrière et rivés du corps cylindrique.

Le ciel du foyer est soit armé par des poutrelles, disposées en long ou en travers, reportant sur les côtés du foyer ou sur son enveloppe, la poussée due à la pression qui s'exerce sur toute sa surface, soit assimilé aux parois verticales et relié au berceau de la boîte à feu par des tirants rapprochés, lesquels ne diffère pas en principe des entretoises.

Les *tubes* sont en contact avec l'eau par leur paroi extérieure et livrent passage par leur intérieur, aux produits de la combustion. Ils sont fixés d'une part dans la *plaque tubulaire du foyer* et d'autre part dans la *plaque tubulaire de la boîte à fumée* limitant le corps cylindrique vers l'avant et le séparant de la boîte à fumée. Ils traversent donc la masse liquide contenue dans la chaudière et établissent une libre communication entre l'intérieur du foyer et l'intérieur de la boîte à fumée. L'étanchéité du joint des tubes sur les plaques est assurée par le serrage dû à l'élargissement intérieur de l'extrémité du tube mis en place produit à l'aide d'un appareil appelé dudgeon et souvent complété par la pose d'une *virole* intérieure ou par un rivetage de l'extrémité du tube.

Le *corps cylindrique* est formé par la réunion de deux ou trois *viroles* cylindriques, assemblées à recouvrement ou par des couvre-joints, et rivées entre elles. L'extrémité arrière de la première virole et l'extrémité avant de la dernière sont rivées, la première à l'enveloppe de boîte à feu, la seconde à la plaque tubulaire de la boîte à fumée.

Le corps cylindrique est surmonté d'un dôme où se fait la prise de vapeur.

La *boîte à fumée* est constituée soit par un simple prolongement du corps cylindrique au delà de la plaque tubulaire avant, soit par une enveloppe spéciale en tôle mince, rivée sur une pince de la plaque en question, emboutie et tournée sur l'avant. La face antérieure de la boîte à fumée est fermée par une tôle dans laquelle est pratiquée sur la plus grande partie de sa surface, une ouverture destinée à la visite intérieure de la boîte et au nettoyage des tubes. Cette ouverture est normalement fermée par une porte à simple ou à double battant. Le joint de cette porte, comme celui des tôles constituant la boîte à fumée doit être parfaitement étanche de manière à éviter à l'intérieur de cette boîte des rentrées d'air, préjudiciables au tirage et susceptibles de déterminer la combustion des escarbilles entraînées par le tirage et déposées dans la boîte à fumée.

Le tuyau d'échappement conduisant au dehors la vapeur qui a cessé d'agir à l'intérieur des cylindres, débouche dans la boîte à fumée. Il est situé dans l'axe de la cheminée; son orifice, circulaire ou rectangulaire, est tourné vers le haut et se trouve placé soit à la base de la cheminée, soit beaucoup plus bas. La vapeur d'échappement, sous l'action de la pression assez élevée qu'elle possède encore, est projetée de bas en haut suivant l'axe de la cheminée et produit par aspiration l'entraînement des gaz.

La *grille* est formée par des barreaux en fer ou en fonte supportés au moyen de *sommiers* reposant sur des tasseaux maintenus par des vis sur la face inférieure du cadre du foyer. Elle est horizontale ou légèrement inclinée.

Sous la grille est placé un *cendrier* constitué par une boîte en tôle fermée

sur ses faces latérales et inférieure, munie généralement à l'avant et à l'arrière des portes ou registres dont le mécanicien peut à l'aide de renvois de mouvement, faire varier l'ouverture. Le cendrier a pour objet de recevoir les escarbilles tombant de la grille, et prévenir ainsi les incendies qui pourraient résulter de leur projection sur la voie. Grâce aux portes dont il est muni, il sert en outre à régler le tirage.

Les plaques de foyer sont presque toujours en cuivre dans les machines européennes et invariablement en acier doux dans les locomotives américaines.

Les tôles du corps cylindrique et de la boîte à feu se font en fer de qualité supérieure ou en acier très doux; l'emploi de ce dernier métal se généralise de jour en jour. L'épaisseur de ces tôles varie, suivant le diamètre du corps cylindrique, le timbre de la chaudière, le coefficient de sécurité adopté, de 11 à 19 mm.

167. Types spéciaux de chaudières locomotives. — Quelques inventeurs ont apporté à la chaudière locomotive des modifications plus ou moins importantes ayant pour but, soit d'améliorer son régime économique, soit d'augmenter sa production ou de faciliter sa construction. La plupart des tentatives faites en vue de s'écarter du type classique n'ont pas répondu aux aspirations de leurs promoteurs; nous n'en retiendrons que quelques-unes, effectuées dans un esprit pratique et qui ont reçu la sanction de l'expérience.

Nous n'avons pas à parler ici des foyers élargis du genre *Belpaire* et *Wootten* qui ne constituent pas une modification de principe mais un simple développement du foyer existant, non plus que des foyers en briques dont il a été question dans un autre chapitre.

Plusieurs inventeurs, désireux d'éviter la construction coûteuse du foyer ordinaire de locomotive avec ses multiples entretoises, ont appliqué à la chaudière locomotive le foyer ondulé du genre *Fox*, entre autres MM. *Strong*, *Webb* et *Lenz*. Ces applications n'ont pas été couronnées d'un grand succès et ne pouvaient pas l'être, au point de vue non de la construction proprement dite, mais du régime économique de la chaudière. Les foyers cylindriques, par leur petit volume et en raison du peu de hauteur libre qu'ils laissent au-dessus de la grille, ne conviennent pas à la combustion active des locomotives; il n'y a pour ainsi dire pas de chambre de combustion et les gaz ne sont pas suffisamment brassés. Pour parer à cet inconvénient M. Strong, et plus tard M. Webb, ont superposé deux foyers cylindriques ondulés semblables; le plus bas portait la grille et communiquait par un bouilleur avec le cylindre supérieur qui remplissait l'office de chambre de combustion et portait la plaque tubulaire.

La chaudière *Lenz* (fig. 299) a reçu de plus nombreuses applications que

les précédentes (en Allemagne). Toutes les parties de la boîte à feu, constituée par des viroles coniques, sont de section circulaire et il n'y a aucune armature ni entretoise. La génératrice inférieure de la chaudière et de la boîte à feu est formée par une ligne droite; les génératrices supérieures des différentes viroles ne lui sont pas parallèles, le diamètre maximum se trouvant atteint dans la partie correspondant à l'avant du foyer; c'est là qu'on a placé le dôme.

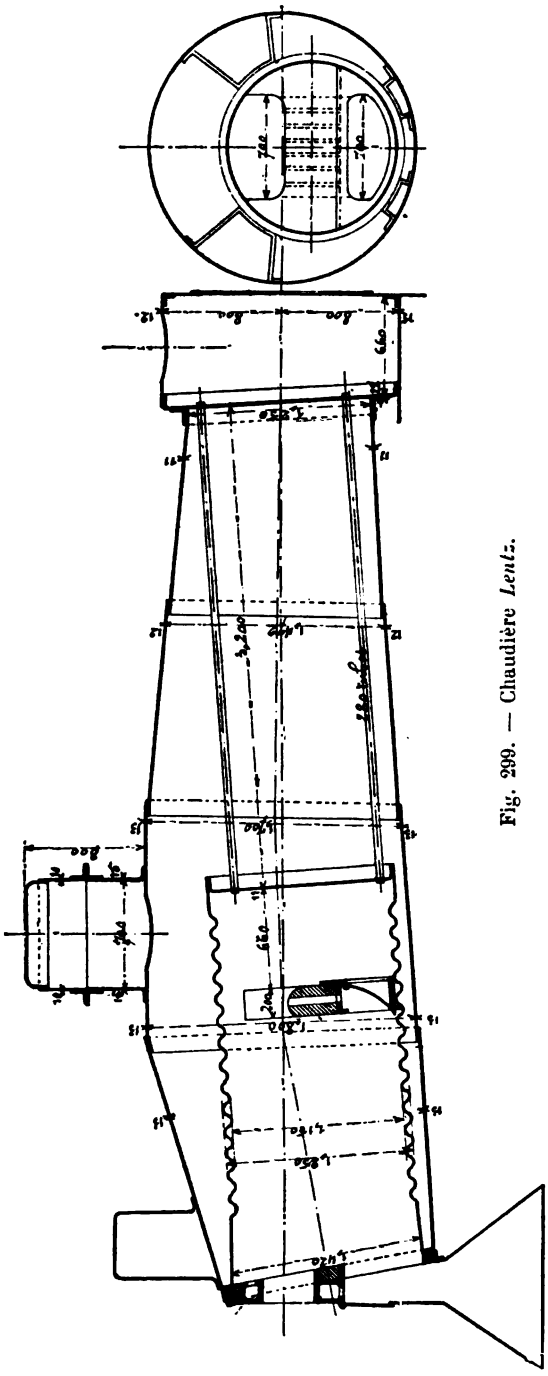


Fig. 299. — Chaudière *Lentz*.

Le foyer est plus long que la grille, séparée de la plaque tubulaire par un vide servant de chambre de combustion et par un autel en briques.

L'axe de la chaudière est horizontal, de sorte que les génératrices supérieure et inférieure sont inclinées, les unes dans un sens, les autres dans l'autre; l'axe du foyer et du faisceau tubulaire est parallèle aux génératrices du bas. L'emploi de cette chaudière ne se développe pas.

M. F.-W. Webb, dans ses locomotives compound du type *Greater Britain*, a été amené, par suite des dispositions générales adoptées, à employer une chaudière de très grande longueur; il en a profité pour appliquer une disposition assez semblable à celle de *Beattie* et *Stevens*, autrefois essayées en Angleterre et aux Etats-Unis. Les gaz traversent d'abord un faisceau de tubes, de 1,780 m. de longueur aboutissant dans une chambre de combustion en acier, placée à l'intérieur du corps cylindrique, d'où les gaz sortent par un second faisceau tubulaire aboutissant dans la boîte à fumée et de 3,073 m. de longueur. Contrairement aux dispositions autrefois suivies par MM. Stevens et Beattie, les deux faisceaux sont constitués par des tubes du même diamètre.

La chambre de combustion est rivée à la base du corps cylindrique par un cadre servant de trou d'homme et que traverse un gros tube conique descendant jusque près du ballast, muni d'un couvercle à sa partie inférieure et qui sert de trémie pour la vidange des escarbilles.

M. Flaman, ingénieur principal des Etudes de la *Compagnie de l'Est*, a

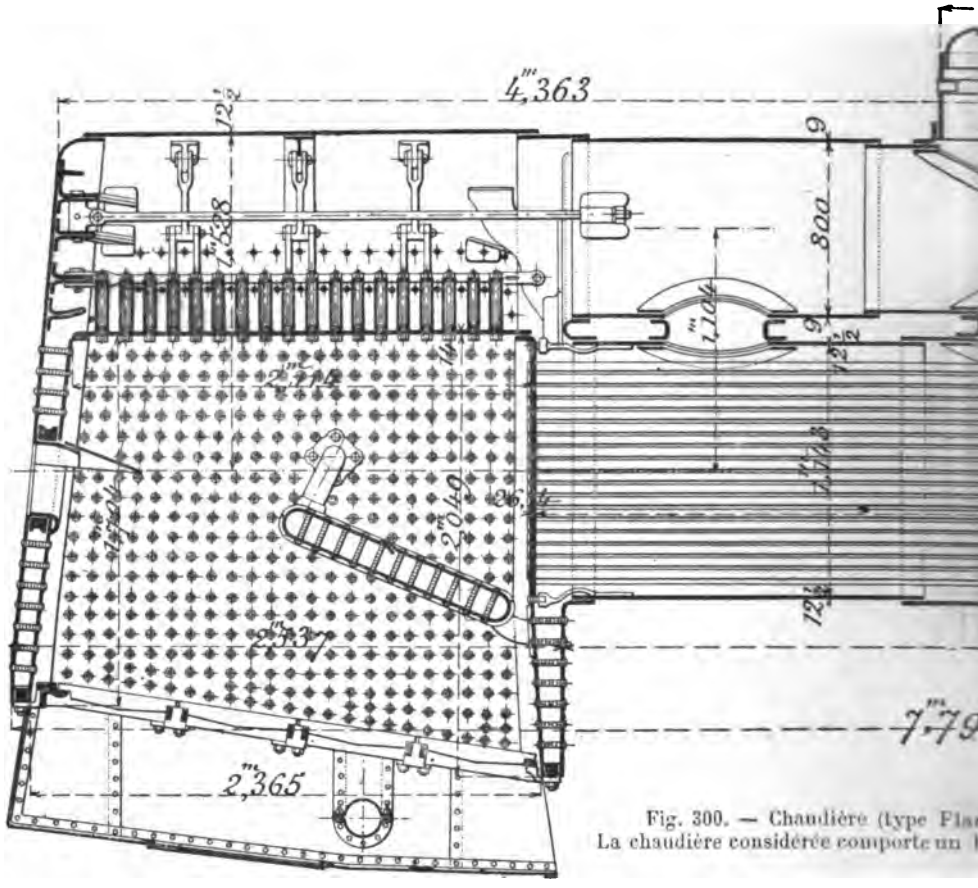


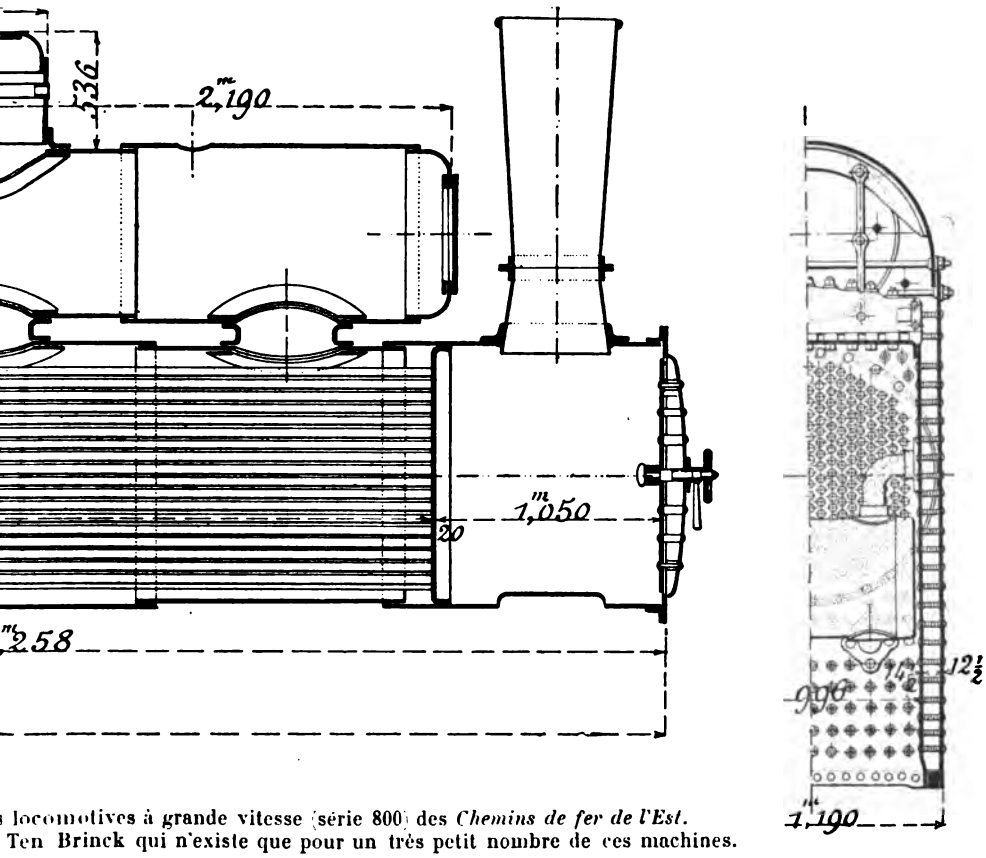
Fig. 300. — Chaudière (type Fla
La chaudière considérée comporte un

étudié un type de chaudière locomotive représenté figure 300, appliqué aux nouvelles express de cette administration et dont nous parlons ailleurs avec plus de détail; nous nous contenterons ici d'en rappeler le principe.

Le corps cylindrique est entièrement rempli de tubes, ce qui donne une augmentation considérable du calorimètre et de la surface de chauffe. La chambre de vapeur est reportée dans un bouilleur longitudinal superposé à la chaudière, avec laquelle il communique par trois cuissards et par une large ouverture régnant suivant la longueur du foyer. Le niveau moyen se trouve placé vers le milieu de ce bouilleur. Cette disposition permet de réaliser, tout en conservant aux divers points de la chaudière — sauf par le travers du foyer bien entendu — des sections circulaires, le but que l'on a autrefois

cherché à remplir en donnant au corps cylindrique une section ovale dont le petit axe était horizontal.

De toutes les dispositions, proposées ou appliquées à titre d'essai, ayant pour but de rapprocher le fonctionnement de la chaudière locomotive de celui des chaudières aquatubulaires, nous n'en citerons qu'une parce qu'elle



locomotives à grande vitesse (série 800) des *Chemins de fer de l'Est*.
Ten Brinck qui n'existe que pour un très petit nombre de ces machines.

est toute récente et paraît avoir donné de bons résultats. Nous voulons parler de la chaudière du système *Perkins* (fig. 301) appliquée à de puissantes locomotives du *Chicago Milwaukee and Saint-Paul RR*, et qui, extérieurement, ne se distingue en rien des chaudières locomotives du type ordinaire. Les gaz passent du foyer dans la boîte à fumée à travers un carneau de grande section, dont la face supérieure est plane, mais n'a pas nécessité l'addition d'armatures, les tubes intérieurs dont nous allons parler la consolidant suffisamment. Des séries de tubes à eau de 51 mm. de diamètre extérieur, verticaux et obliques, réunissent les faces opposées du bouilleur sur lesquelles elles sont mandrinées.

La surface de chauffe totale est moindre que dans les chaudières locomo-

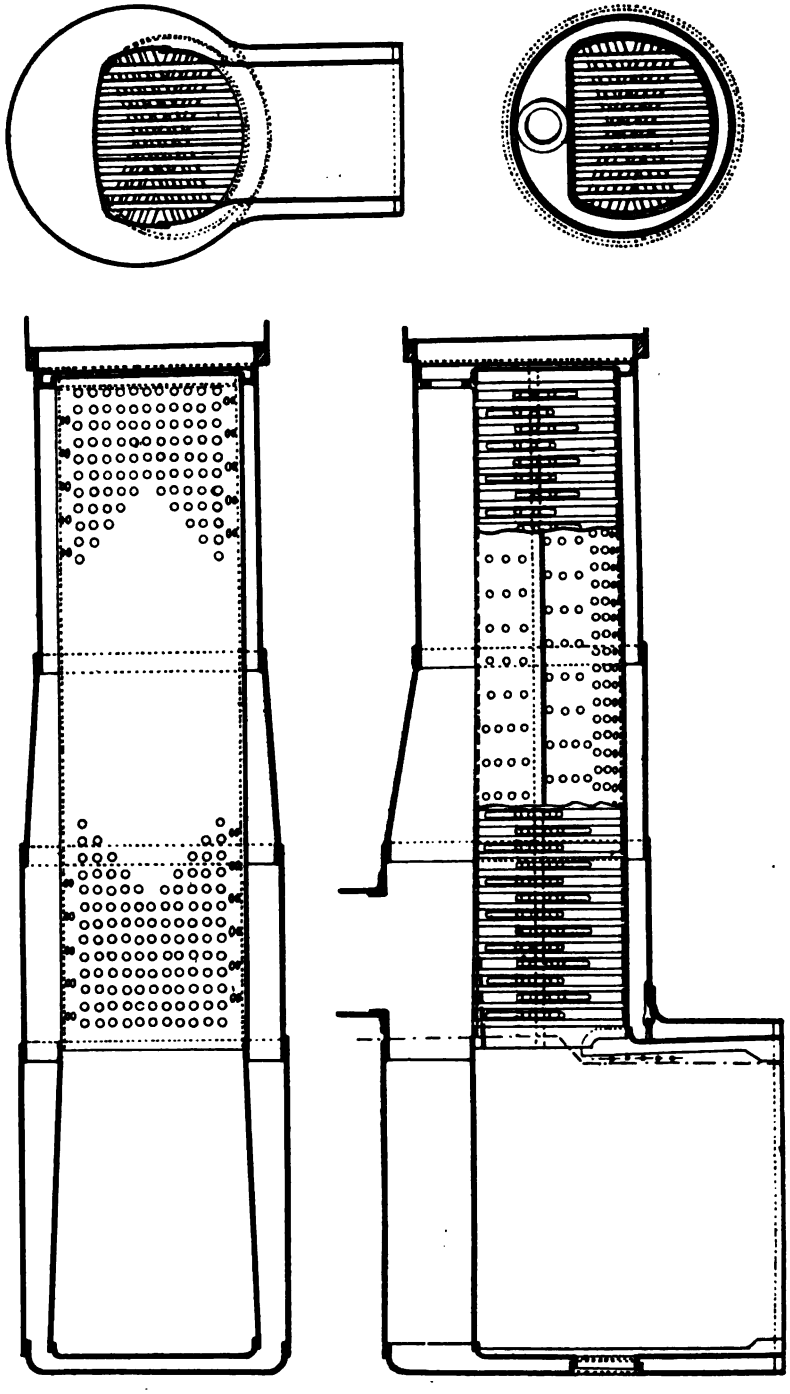


Fig. 301. — Chaudière *Perkins*. Locomotives (type D), du *Chicago, Milwaukee and Saint-Paul Railroad.*

tives ordinaires des mêmes dimensions extérieures, mais elle est plus active

et produit au moins autant. La combustion se fait bien, les gaz étant brassés très vigoureusement à leur passage entre les tubes alternés; ils s'y dépouillent aussi complètement de leurs escarbilles entraînées au point qu'ils ont pu dispenser de l'emploi de pare-étincelles.

La circulation est, paraît-il, fort active dans les tubes et ceux-ci ne se bouchent pas, les dépôts n'ayant aucune tendance à s'y former. D'après le *Railroad Gazette*, le prix d'une semblable chaudière n'est pas supérieur à celui d'une chaudière locomotive ordinaire de même puissance; l'application aux chaudières existantes n'entraînerait pas de frais notablement supérieurs à ceux résultant du remplacement, dans une chaudière existante, du faisceau et des plaques tubulaires.

Ce type de chaudière a surtout été expérimenté par le *C. M. and Saint-Paul* dans le but d'éviter les inconvénients résultant des nombreuses fuites aux tubes que donnent les chaudières ordinaires de ce réseau par suite de la mauvaise qualité des eaux. Jusqu'ici, les chaudières Perkins n'ont donné lieu à aucune fuite; les efforts de dilatation n'ont pas d'effet sur les attaches des tubes ; ceux-ci se dilatent en effet de la même quantité que l'enveloppe formant le carneau dont ils constituent des diamètres.

168. Position relative du foyer et des essieux. — Si la chaudière de la locomotive était cylindrique sur toute sa longueur, son installation ne présenterait aucune difficulté et, sans s'arrêter à d'autres considérations, on pourrait l'allonger ou la raccourcir à volonté et déterminer sa position longitudinale en vue d'obtenir une répartition satisfaisante du poids sur les essieux. Le problème est en réalité beaucoup moins simple.

La saillie importante que fait la boîte à feu vers le bas, saillie d'ailleurs variable suivant que le foyer est profond ou aplati, peut entraîner pour la loger et assurer la répartition, à modifier l'écartement partiel ou total des essieux. Le plus souvent on est amené à combiner à la fois la disposition relative ou l'entraxe des essieux et les dimensions longitudinales du foyer et du corps cylindrique de manière à obtenir une solution satisfaisante. Les proportions du foyer peuvent être affectées par l'écartement que l'on peut donner aux essieux arrière et même, dans certains cas, par le diamètre des roues. Il existe, en somme, entre le châssis et la chaudière, des relations mutuelles qu'il faut respecter et dont on sera d'autant plus esclave que le foyer sera plus profond ou que les roues arrière auront un plus grand diamètre.

Le corps cylindrique lui-même peut donner lieu à certaines difficultés d'installation si la puissance qu'il est nécessaire de développer entraîne à porter son diamètre à une cote supérieure à l'écartement intérieur des bandages des roues motrices.

Examinons d'abord le cas des chaudières à foyer profond. Si la machine

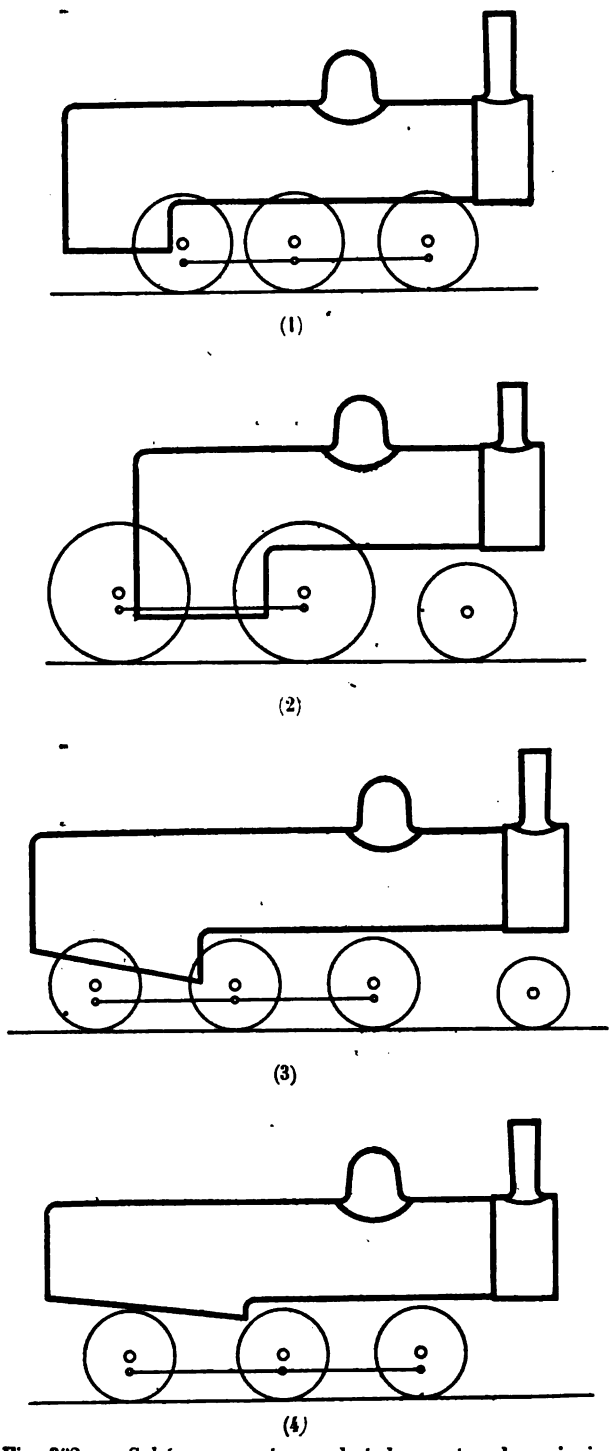


Fig. 302. — Schémas ayant pour but de montrer les principales dispositions que peut affecter le foyer par rapport aux roues et aux essieux.

est destinée à des services peu rapides et que la longueur du foyer ne soit pas considérable, on peut placer les trois essieux sous le corps cylindrique [(1) fig. 302] et disposer le foyer en porte à faux à l'arrière. La stabilité ne sera pas satisfaisante en raison de ce grand porte à faux et par suite du faible empattement, même en donnant au corps cylindrique une longueur exagérée à ne considérer que la puissance et le rendement de la chaudière. Le centre de gravité se trouve reporté vers l'arrière d'où une surcharge du dernier essieu et une charge insuffisante sur le premier essieu, à moins que l'on ne place les cylindres vers l'avant plus qu'il n'est strictement nécessaire pour les loger, devant l'essieu s'ils sont intérieurs, devant les roues s'ils sont extérieurs, ce qui accroît le porte à faux antérieur, ou de placer un lest dans la traverse avant. Pour améliorer la répartition, on reporte en outre le dôme vers l'avant, aussi près que possible de la boîte à fumée.

Avec cette disposition, les ressorts de l'essieu arrière sont très difficiles à installer et l'on est obligé de recourir à des artifices plus ingénieux que louables. On a été jusqu'à fixer les axes des tiges de pression de ces ressorts dans des pattes rivées au corps cylindrique.

Le type de machine, résultant de cet arrangement général, a été fort usité à une certaine époque pour des services même relativement rapides. Les deux essieux arrière étaient accouplés et l'essieu avant était porteur. On ne le construit plus depuis longtemps pour le service des trains de voyageurs, bien que beaucoup de ces locomotives soient encore en service sur les lignes secondaires et même sur quelques grandes lignes (trains omnibus), mais il est resté en France, tout au moins, le type le plus répandu de machines à marchandises (à six ou huit roues accouplées). Pour la traction de trains à faible vitesse, cette disposition présente peu d'inconvénients, mais elle est condamnée dans l'avenir, car elle ne permet pas d'allonger le foyer.

On peut éviter le porte à faux à l'arrière et constituer une machine très stable en plaçant le foyer entre les deux essieux accouplés arrière [(2) fig. 302]. La longueur des tubes est limitée par la nécessité de ne pas trop accroître l'empattement, déjà plus considérable que dans le cas précédent. La répartition du poids n'est pas très satisfaisante parce que le centre de gravité de la chaudière se trouve reporté vers l'avant et l'essieu arrière n'est pas assez chargé, l'essieu avant l'étant trop au contraire. On y remédie, soit en plaçant, à l'arrière, un lest en fonte, sous la plate-forme (machines anglaises), soit en donnant aux éléments du foyer des échantillons très robustes, soit en adoptant un foyer renflé, plus lourd (*Ouest;* Série 621-636). La meilleure solution consiste à donner à la chaudière un volume suffisant pour assurer un poids total adhérent convenable sans placer de lest à l'arrière et à supporter l'avant de la machine par un bogie capable de recevoir une charge qui serait inadmissible sur un seul essieu. On complète avantageusement la machine par l'emploi de balanciers longitudinaux reliant les deux essieux accouplés arrière et égalisant les charges. Le bogie permet en outre, sans réduire la souplesse de la machine, soit d'allonger la chaudière, soit de reporter à l'avant, même au delà de la plaque tubulaire de la boîte à fumée, le point de support des roues porteuses et par conséquent d'accroître la charge sur les roues arrière. Ce type de machine est excellent; il permet de combiner les avantages du foyer profond à une grande stabilité, tout en évitant les charges excessives des essieux avant. C'est à lui qu'appartiennent les nouvelles express des Compagnies de l'*Ouest*, du *Nord*, de l'*Est* et du *Midi*. Il est d'un usage absolument général en Angleterre (où on continue cependant, pour obtenir un poids adhérent élevé, bien que les chaudières soient d'assez petit volume, l'emploi du lest placé à l'arrière), très usité en Amérique et dans les colonies anglaises.

Cette disposition relative de la chaudière et des roues s'applique aussi aux machines à six roues accouplées à adhérence totale (Machines de banlieue séries 3 500, *Ouest;* toutes les machines à marchandises anglaises, etc.), et

à adhérence partielle, munies à l'avant d'un truck articulé à un ou deux essieux (machines américaines *Mogul* et *Ten-wheelers*).

Dans les machines de ce type à quatre ou six roues accouplées et à trois essieux seulement, les cylindres doivent être autant que possible placés à l'intérieur ; s'il en était autrement, il faudrait les reporter davantage vers l'avant pour qu'ils puissent éviter les roues du premier essieu, ce qui augmenterait encore le poids porté par celles-ci et déchargerait d'autant les roues arrière. Quand on place un bogie à l'avant, cette considération peut n'avoir plus de valeur.

Cette excellente disposition ne se prête pas à une augmentation indéfinie de la puissance des machines, la longueur du foyer, lequel descend entre les essieux accouplés, étant limitée par la longueur maximum que l'on croit pouvoir donner aux bielles d'accouplement. On considère actuellement qu'il est difficile de donner plus de 3,00 m. à l'entraxe des roues accouplées, ce qui limite la longueur extérieure du foyer à 2,20 m. environ avec des cylindres intérieurs et à 2,60 m. avec des cylindres extérieurs. Cette cote de 3,00 m. a été adoptée pour les express à bogie du *Nord*, de l'*Ouest* et de l'*Est*, construites depuis 1891.

Si on veut allonger davantage le foyer ou si l'on désire ne pas autant écarter les essieux accouplés arrière, on est amené à renoncer au foyer très profond et à faire passer le cadre par-dessus l'essieu arrière [(3) fig. 302]. On peut alors porter la longueur du foyer au maximum admissible eu égard à la conduite du feu. On est maître de donner encore au foyer, bien que son cadre se trouve beaucoup plus haut que dans le type précédent, une profondeur satisfaisante en relevant de la quantité nécessaire l'axe du corps cylindrique et en inclinant le cadre vers le bas, à l'avant.

Cette dernière disposition a été appliquée aux machines compound à quatre cylindres et à bogie de la *Compagnie de Lyon* et aux nouvelles express très puissantes, également compound et à quatre cylindres, construites par la *Société alsacienne* pour les Compagnies du *Midi*, de *l'Ouest* et du *Nord*. C'est aussi celles qui a été appliquée en Amérique aux locomotives à grande vitesse les plus fortes qui aient jamais été construites (*New York Central*, *Pensylvania*, etc.).

On est ainsi revenu, par suite des considérations que nous venons d'exposer, à une disposition déjà ancienne et extrêmement répandue. En dehors des réseaux anglais, la très grande majorité des locomotives usitées actuellement, surtout en Belgique, en Suisse, en Allemagne ont le foyer placé à cheval au-dessus d'un essieu accouplé ; la Compagnie, du *Nord* possède un nombre considérable de ces locomotives appartenant à cette catégorie ; celles de l'*Ouest* et de l'*Est* en comptent aussi beaucoup à leur effectif. Il est juste d'ajouter que, en ce qui concerne les machines à voyageurs et par consé-

quent à grandes roues, cet arrangement donne plus de satisfaction aujourd'hui parce que l'on ne craint plus de relever assez les chaudières pour éviter de réduire la profondeur du foyer à un degré qui ne convient pas à tous les combustibles.

Un des principaux arguments que l'on présente en faveur des locomotives à roues indépendantes consiste dans la facilité de développer le foyer vers l'arrière, sans exiger un relèvement excessif de la chaudière, le cadre passant alors au-dessus d'un essieu porteur monté sur des roues de petit diamètre. Il en est de même des locomotives à quatre roues accouplées sur l'avant [(2) fig. 303]. C'est cette considération qui avait conduit M. Stroudley à adopter, sur le réseau du *Brighton*, des machines de ce type. Actuellement, on considère les locomotives à quatre roues accouplées sur l'avant comme des machines mixtes, et l'on préfère, pour les services rapides, attaquer la voie à l'avant par un essieu porteur ou un bogie.

Quand, partant d'un

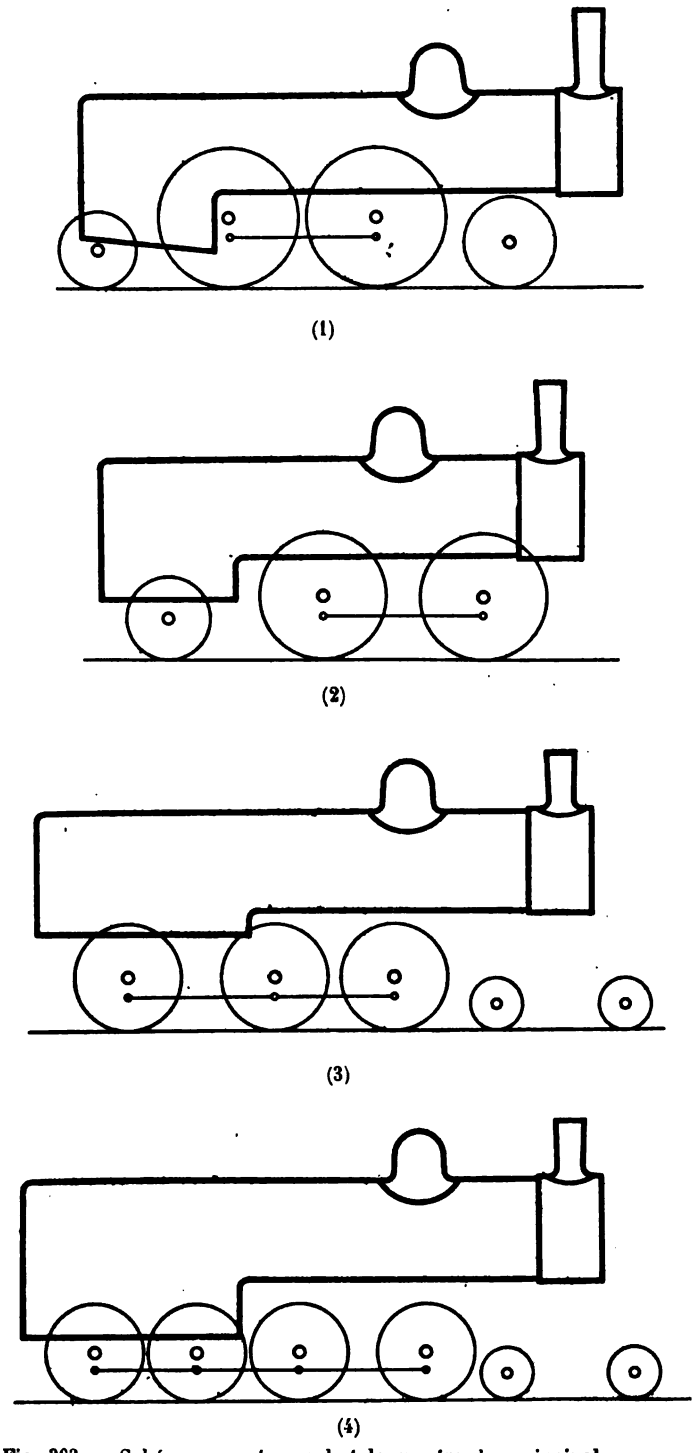


Fig. 303. — Schémas ayant pour but de montrer les principales dispositions que peut affecter le foyer par rapport aux roues et aux essieux.

type de machine à foyer en porte à faux, on éprouve la nécessité d'allonger la grille, on peut, sans modifier la chaudière, et tout en améliorant la stabilité, satisfaire à ce desideratum en ajoutant à l'arrière un essieu porteur passant sous la partie postérieure du cadre [(1) fig. 303]. Il suffit d'incliner légèrement ce dernier pour ne pas diminuer la profondeur à l'avant ; on pourrait obtenir le même résultat en relevant la chaudière. Toutes les locomotives à grande vitesse de la Compagnie d'*Orléans*, les anciennes machines express de la Compagnie de *Lyon* (série 111 à 400) offrent cette disposition.

Dans les machines à marchandises à six et huit roues accouplées, le faible diamètre des roues permet de placer le foyer au-dessus de l'essieu accouplé arrière, et, sans sortir des proportions usuelles, de lui donner une assez grande profondeur. Dans quelques locomotives américaines de très grande puissance, le foyer passe même au-dessus des deux derniers essieux [(4) fig. 303].

Enfin, et c'est une question sur laquelle nous reviendrons, le foyer peut passer au-dessus des roues arrière [(4) fig. 302].

169. Dimensions longitudinales et tranversales maxima imposées aux boîtes à feu par les conditions d'établissement des organes constituant le véhicule. — Qu'il soit profond ou aplati, le foyer descend entre les longerons; afin de permettre sa mise en place, tout en ménageant le jeu nécessaire et la place voulue pour les têtes des entretoises, on ne peut lui donner qu'une largeur extérieure un peu inférieure à l'écartement intérieur des longerons, soit environ 1,23 m. Cette largeur peut être réduite à 1,19 m. si le foyer doit trouver place, en un de ses points, entre les pattes d'attache, sur le châssis, des glissières de plaques de garde. Ordinairement, pour éviter cette sujétion, on s'arrange pour arrêter la tôle du berceau immédiatement en arrière ou en avant de cette patte d'attache et on donne à l'arrondi des pinces des façades un rayon suffisant pour qu'elles ne viennent pas toucher les glissières des boîtes [(1) fig. 304].

Aux Etats-Unis, les longerons sont en fer forgé et ont une épaisseur beaucoup plus grande que dans les locomotives européennes (70 à 110 m/m), ce qui limite, suivant les cas, la largeur extérieure des boîtes à feu, à 1,01 m. ou 1,06 m. au grand maximum (sur la voie normale) (fig. 308). Nous verrons plus loin comment les Américains échappent à cet inconvénient.

En plaçant les longerons à l'extérieur des roues, la largeur du foyer n'est plus limitée que par l'écartement intérieur des bandages et on peut lui donner, en laissant les jeux nécessaires, une valeur de 1,25 m. environ (fig. 305). En outre, on n'est plus gêné par les boîtes ni leurs glissières qui se trouvent au dehors, ce qui permet de rapprocher le cadre de l'essieu

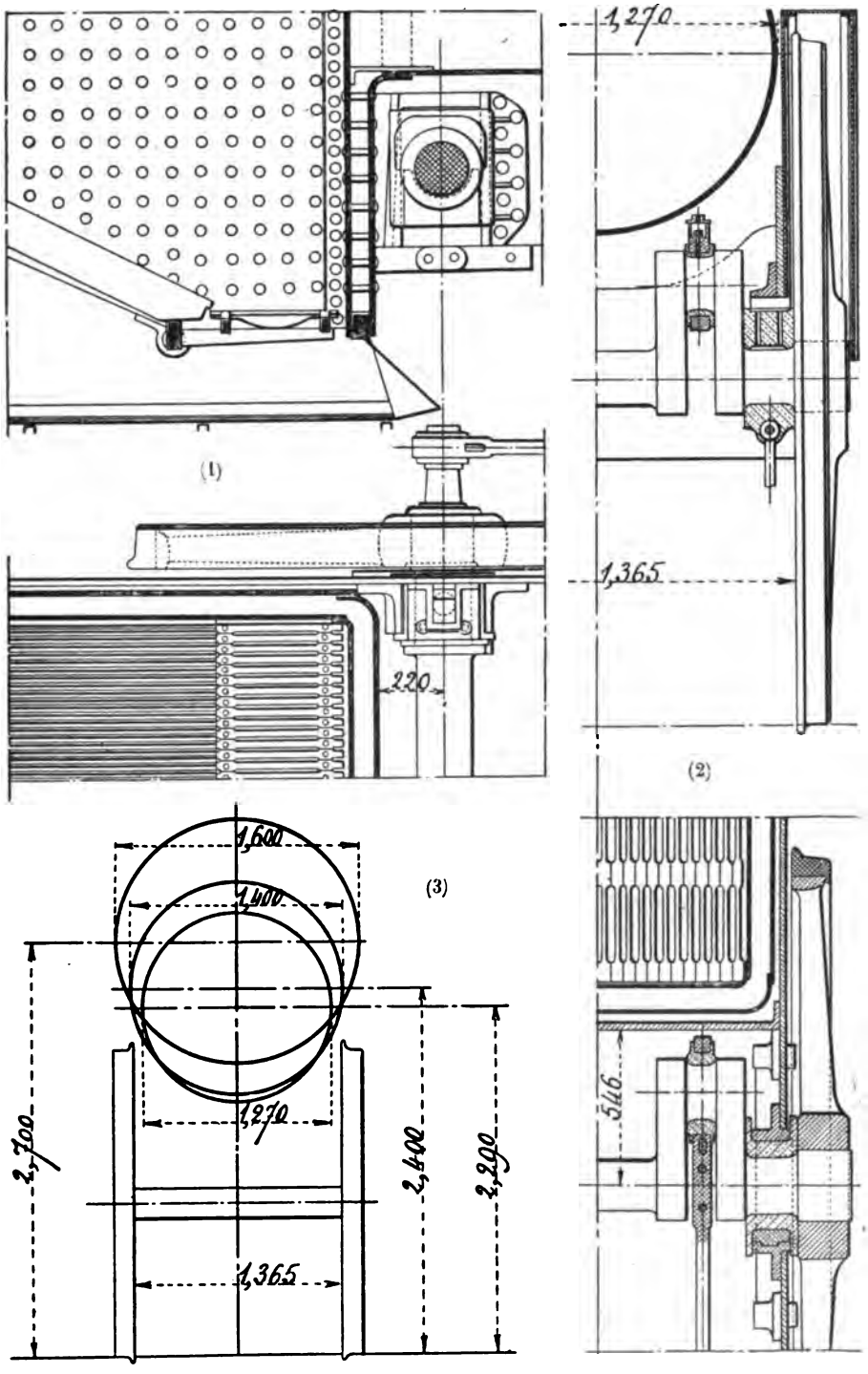


Fig. 304. — Schémas de principe ayant pour but de montrer les positions limites imposées à la face avant du foyer par rapport à l'essieu moteur dans le cas de cylindres extérieurs (1) et intérieurs (2) ; et les relations pouvant exister entre le diamètre du corps cylindrique et la hauteur de son axe au-dessus des rails (3).

dans le sens vertical et horizontal. Les ressorts sont aussi plus faciles à installer. Toutefois, cette disposition n'est guère usitée dans les machines

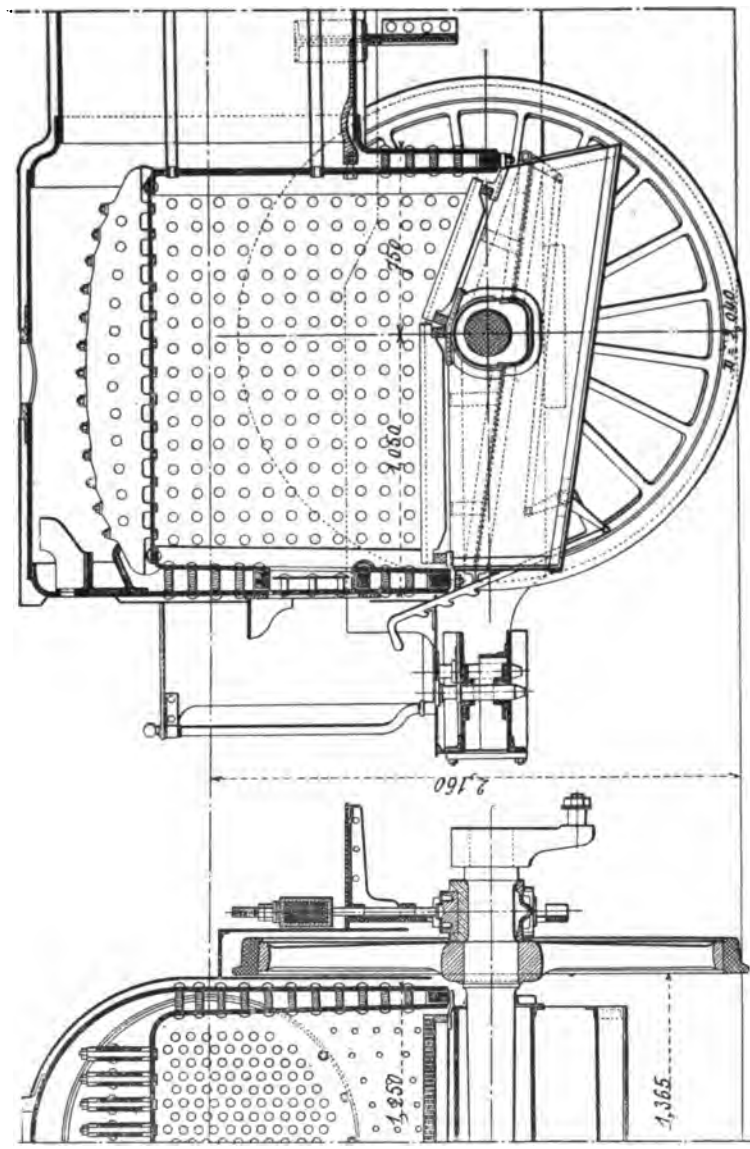


Fig. 305. — Type de foyer à cheval au-dessus d'un essieu. Dans la machine choisie comme exemple, les longerons et les boîtes sont extérieurs, ce qui permet d'approfondir un peu le foyer sans surélever le corps cylindrique et d'élargir la boîte à feu.

récentes, en raison de la suppression de l'entretoisement des longerons sur une longueur au moins égale au diamètre des roues. Pour éviter ces inconvénients, on munit parfois les machines à châssis extérieur de longeronnets intérieurs placés suivant toute la longueur du foyer et consolidant cette partie du bâti dans le sens transversal ; on perd alors, pour l'élargissement du foyer, les avantages résultant de la position extérieure des longerons, mais

on peut encore profiter de celui qui provient de l'absence de boîtes intérieures par le travers de la boîte à feu.

Le cadre du foyer est plus bas que l'essieu moteur ou accouplé placé devant lui ; si l'on se reporte à la figure 304, on verra que la distance minimum à laquelle la face avant de ce foyer peut se trouver de l'axe de cet

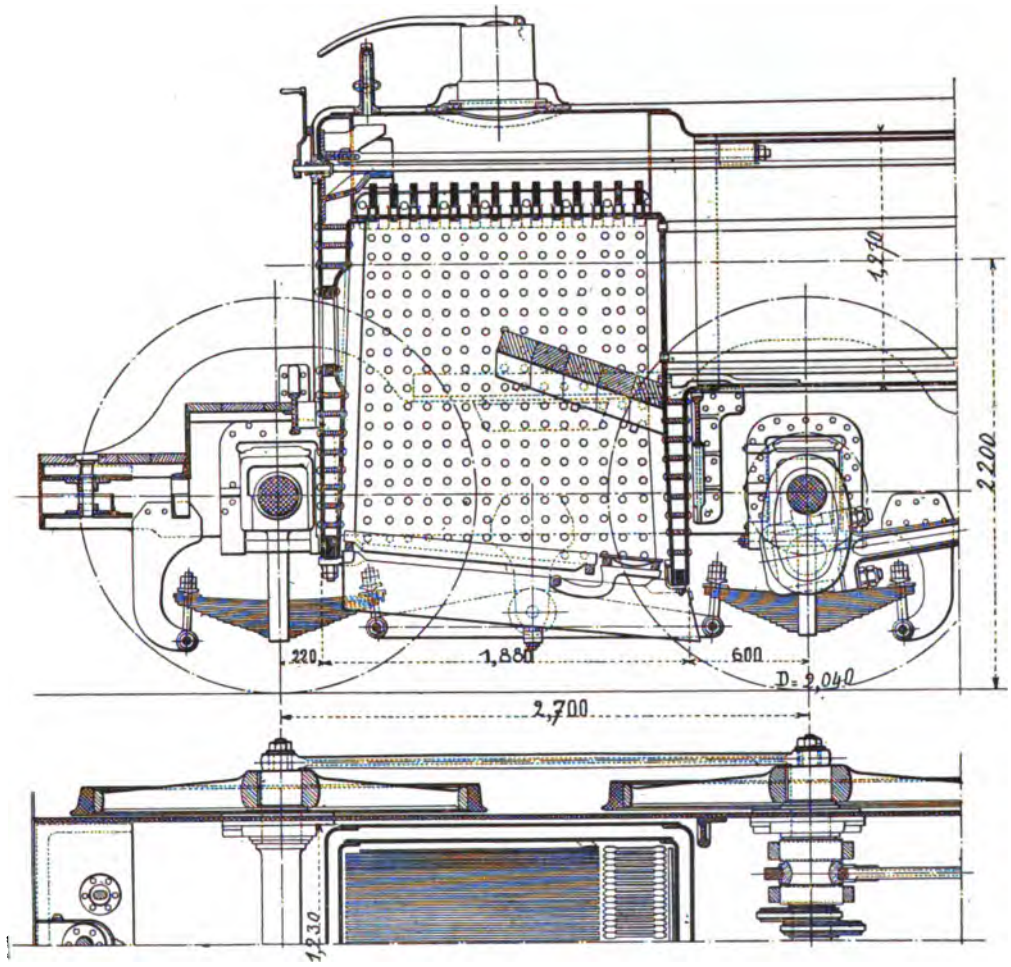


Fig. 306. — Type de foyer profond plongeant entre deux essieux accouplés (*Ouest*).

essieu, quand il est droit, est de 0,220 m., à cause de la présence des glissières de boîtes. Il en est de même de la face arrière si le foyer plonge entre les deux essieux accouplés (fig. 306). Quand les cylindres sont intérieurs, il faut en outre ménager l'espace voulu pour le passage des manivelles et des têtes de bielles que l'on doit alors disposer de manière qu'elle fassent, vers l'arrière, le moins de saillie possible (têtes de bielles à étriers ou à chapes). Avec une course de 0,660 m., on ne peut placer la face avant du

foyer à une distance de l'axe de l'essieu moteur inférieure à 0,600 m. Si donc le foyer descend entre les deux essieux accouplés arrière, sa longueur maximum sera égale à l'entraxe des deux essieux diminué de

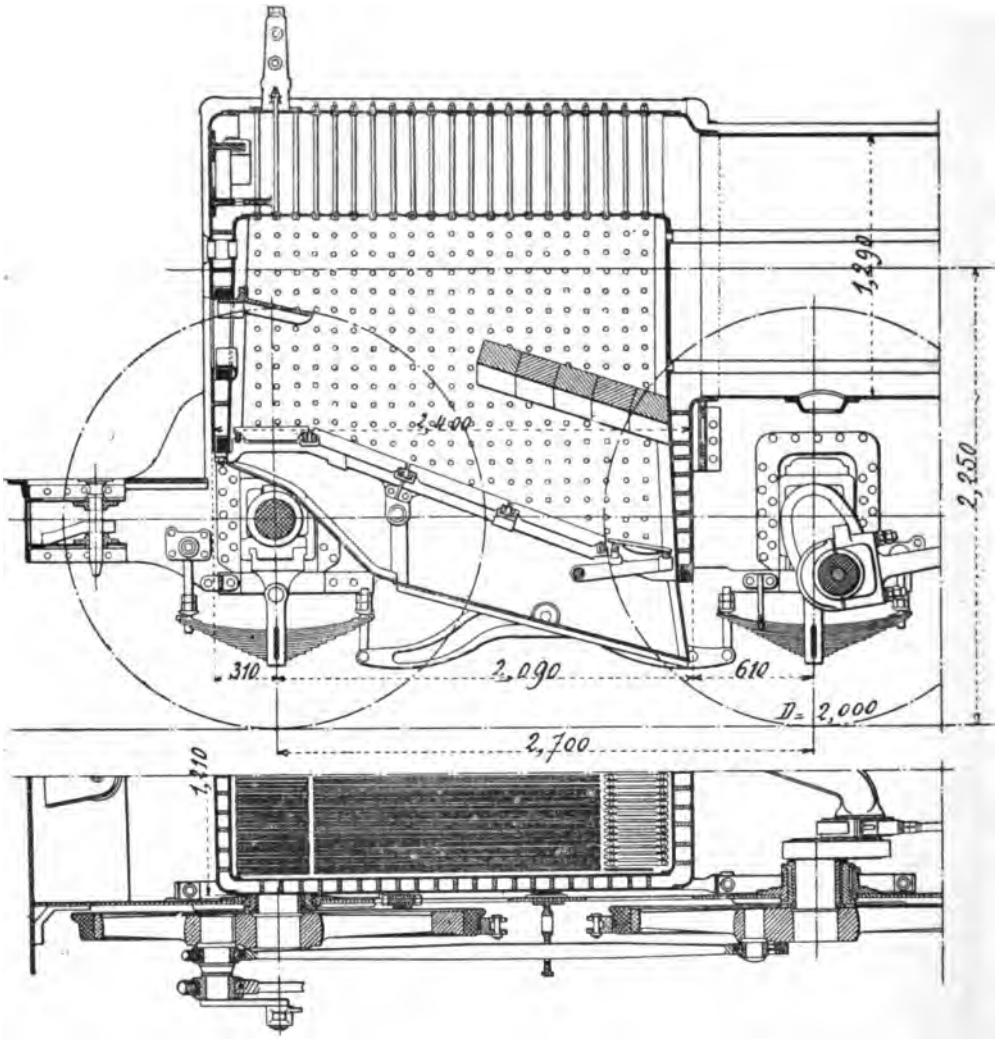


Fig. 307. — Type de foyer passant, par sa partie postérieure, au-dessus d'un essieu accouplé placé à l'arrière (*P.-L.-M.*). C'est la disposition la plus fréquemment adoptée aujourd'hui pour les locomotives à grande vitesse.

0,220 m. + 0,600 m. = 0,820 m. ou de 2 × 0,220 m. = 0,440 m. suivant que les cylindres seront intérieurs ou extérieurs. Pour un entraxe maximum de 3,00 m., la longueur extérieure la plus grande que l'on pourra donner au foyer avec des longerons intérieurs sera de 2,18 m. dans le premier cas, et de 2,56 m. dans le second. Si on veut donner au foyer une plus grande longueur, on devra le faire passer par-dessus l'essieu arrière.

On trouvera figures 306 et 307 ces deux dispositions appliquées, la première à des locomotives express à bogie de la *Compagnie de l'Ouest* (951-952), la seconde à celle de la *Compagnie de Lyon* (C. 21-60). L'entraxe des essieux est le même dans les deux cas (2,70 m.), mais le foyer de la première machine, qui descend entre les deux essieux a 1,88 m. de longueur extérieure, tandis que celui de la seconde a 2,40 m. Il est vrai que le premier étant profond présente sensiblement la même surface directe et permet peut-être une allure un peu plus forcée de la combustion. D'ailleurs, dans ses machines express plus récentes, la *Compagnie de l'Ouest* a augmenté l'entraxe des essieux accouplés et la longueur du foyer.

Quand le foyer descend entre les essieux qui l'encadrent, la hauteur de son arête inférieure au-dessus du rail n'est limitée que par le gabarit. S'il passe au-dessus d'un essieu, elle doit se trouver au-dessus de ce dernier à une distance d'environ 0,05 m. au minimum afin de permettre le jeu vertical de l'essieu sous l'influence des dénivellations de la voie, quand les longerons sont extérieurs (fig. 305). Dans le cas, beaucoup plus général, où ces derniers sont intérieurs, le cadre doit être reporté à une grande hauteur, afin d'éviter les glissières des plaques de garde (fig. 307). Pour que la profondeur du foyer reste quand même suffisante, il est d'usage d'incliner le cadre vers l'avant dans toute la partie antérieure. La disposition de la figure 305 (anciennes express de la *Compagnie de l'Ouest*) ne serait pas possible avec des longerons intérieurs, les glissières des plaques de garde obligeraient à donner au foyer une profondeur absolument insuffisante, à moins de relever d'au moins 0,30 m. le corps cylindrique.

170. Procédés employés pour permettre l'élargissement du foyer. — On ne peut allonger indéfiniment la grille; la longueur maxima imposée par la nécessité d'une conduite facile du feu est comprise entre 2,60 m. et 2,80 m.; bien que l'on soit allé à l'étranger jusqu'à 3,00 m., la cote de 2,70 m. semble la vraie limite pratique. L'accroissement de la surface de grille ne peut donc se réaliser, au delà de cette limite, que par l'élargissement du foyer, qui n'est possible qu'à la condition de rompre avec les anciens errements. Les Américains qui emploient nous l'avons vu, des longerons en fer forgé très épais, ont depuis une douzaine d'années commencé à se soustraire à l'obligation de limiter la largeur des boîtes à feu à 1,05 m. au grand maximum (fig. 308), en plaçant le cadre du foyer au-dessus des longerons ; ils purent ainsi porter la largeur extérieure du foyer à 1,25 m., comme si le châssis était extérieur, gagnant de la sorte de 0,25 m. à 0,19 m. suivant l'épaisseur des longerons. Cela permettait avec un foyer de 2,50 m. de longueur intérieure, d'augmenter la surface de grille de 0,60 m². En Europe, on a parfois eû recours au même procédé, mais avec beaucoup moins d'avantage ; à cause de la

faible épaisseur des longerons (25 à 30 mm. au plus), on ne gagnait ainsi que 50 à 60 mm. L'augmentation de la surface de grille ainsi réalisée, même aux Etats-Unis, parut encore bien faible quand on voulut soit accroître la puissance dans une très grande proportion, soit plutôt disposer les foyers

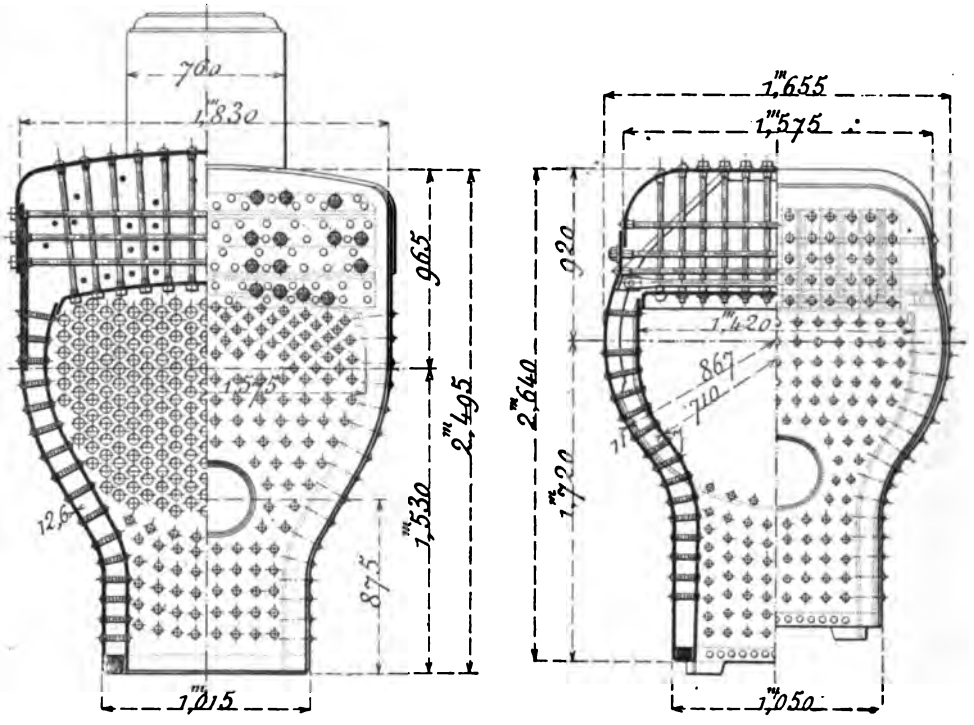


Fig. 308. — Foyers américains rétrécis vers le bas pour se loger entre des longerons en fer forgé (Coupes transversales).

en vue de brûler des combustibles menus ou inférieurs. On fut alors amené, sur quelques réseaux, à prendre une mesure radicale et à faire passer la grille au-dessus des roues. Dès lors, la largeur du foyer n'était plus limitée que par le gabarit et on pouvait la porter à près de 3,00 m. s'il était nécessaire. Cette disposition n'est pas nouvelle, elle avait déjà été appliquée en 1861 par M. Petiet sur ses fameuses machines-tenders à marchandises à huit et douze roues accouplées et fut, vers la même époque, réalisée aux Etats-Unis sur quelques locomotives destinées à brûler des anthracites, mais elle ne s'est généralisée que récemment. M. Belpaire à l'*Etat belge*, et M. Wootten aux Etats-Unis ont été les principaux instigateurs de cette nouvelle disposition (voir fig. 269). En Belgique, on s'est borné à l'appliquer aux locomotives à six roues accouplées d'un diamètre ne dépassant pas 1,70 m. ou à des machines express dans lesquelles le foyer ne passait qu'au-dessus d'un essieu porteur monté sur des roues de faible diamètre, le foyer n'étant

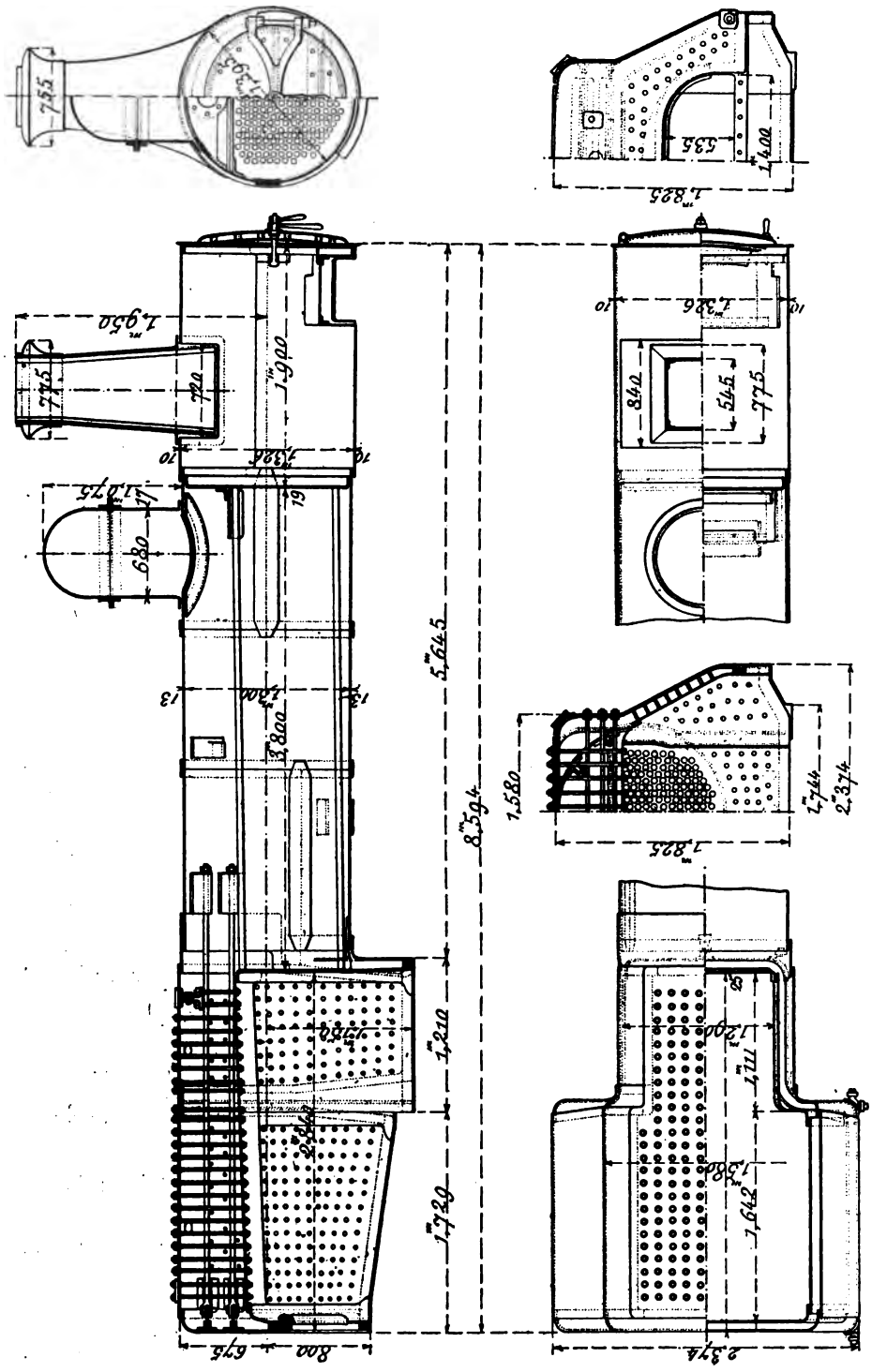


Fig. 309. — Chaudière, avec foyer Belpaire élargi, de l'*État belge* (Locomotives du type 12).

pas élargi dans la partie comprise entre les roues accouplées (fig. 309).

Cela avait amené cependant à placer l'axe de la chaudière à une hauteur de 2,40 m. à 2,45 m. environ, cotes qui furent un moment exceptionnelles en Europe. Aux Etats-Unis on a été plus loin, cette disposition appliquée d'abord à des locomotives montées sur des roues de faible diamètre, l'est maintenant à des machines express à quatre roues accouplées sur l'arrière, de 1,90 m. et même de 2,00 m. de diamètre (fig. 221 et 222). Le cadre du foyer est ainsi porté à une hauteur de 2,10 m. environ au-dessus du rail et l'axe du corps cylindrique à 2,70 m. Encore le foyer est-il extrêmement plat et ne convient-il qu'à la combustion de l'anthracite menu.

Les nouvelles locomotives du type 16 de l'*Etat belge* présentent une disposition unique en Europe. Le foyer, très long et qui déborde de chaque côté au-dessus des roues accouplées, passe aussi au-dessus des roues motrices situées au milieu et des manivelles de l'essieu coudé.

Grâce à ces artifices, les Belges ont pu porter la surface de grille à plus de 6 m² et les Américains à plus de 8 m² (*Philadelphia and Reading, Erie, Lehigh Valley*).

Plus récemment, aux Etats-Unis, on a adopté le même arrangement pour de très puissantes locomotives destinées à brûler des charbons bitumineux, l'élargissement du foyer étant beaucoup moins prononcé, car il ne s'agissait que d'obtenir des surfaces de grille de 4 à 5 m². Toutefois, comme il était de toute nécessité que ces foyers restassent assez profonds et que l'on ne pouvait relever davantage les chaudières, on a dû renoncer au type de machine classique en Amérique et adopter une disposition semblable à celle de l'*Etat belge* (ou, en ce qui concerne simplement la disposition des essieux, à celles du type express *P. O.*), reporter les roues motrices et accouplées au centre, devant le foyer, et placer une paire de roues porteuses sous la boîte à feu (voir fig. 221, 223, 224 et 225). Cette disposition a été adoptée par Baldwin pour un certain nombre de locomotives construites depuis 1892 (type *Columbia*). L'avant s'est alors trouvé supporté par un bissel placé à l'avant des cylindres ou par un bogie.

171. Profondeur des foyers. — La profondeur est un des éléments importants des foyers ; elle a une action très marquée sur le régime de la combustion et sur l'utilisation du combustible.

Dans les foyers de profondeur peu considérable, les gaz sont insuffisamment brassés et viennent en contact avec les surfaces relativement froides du ciel avant que leur combustion ne soit complète, ce qui occasionne fréquemment leur extinction, d'où une perte sèche que rien ne compense ; la grille est trop près des tubes dont les bouts se trouvent chauffés d'une manière exagérée, ce qui peut amener des fuites ; le combustible ne peut être brûlé en couche assez épaisse pour permettre une combustion très active ;

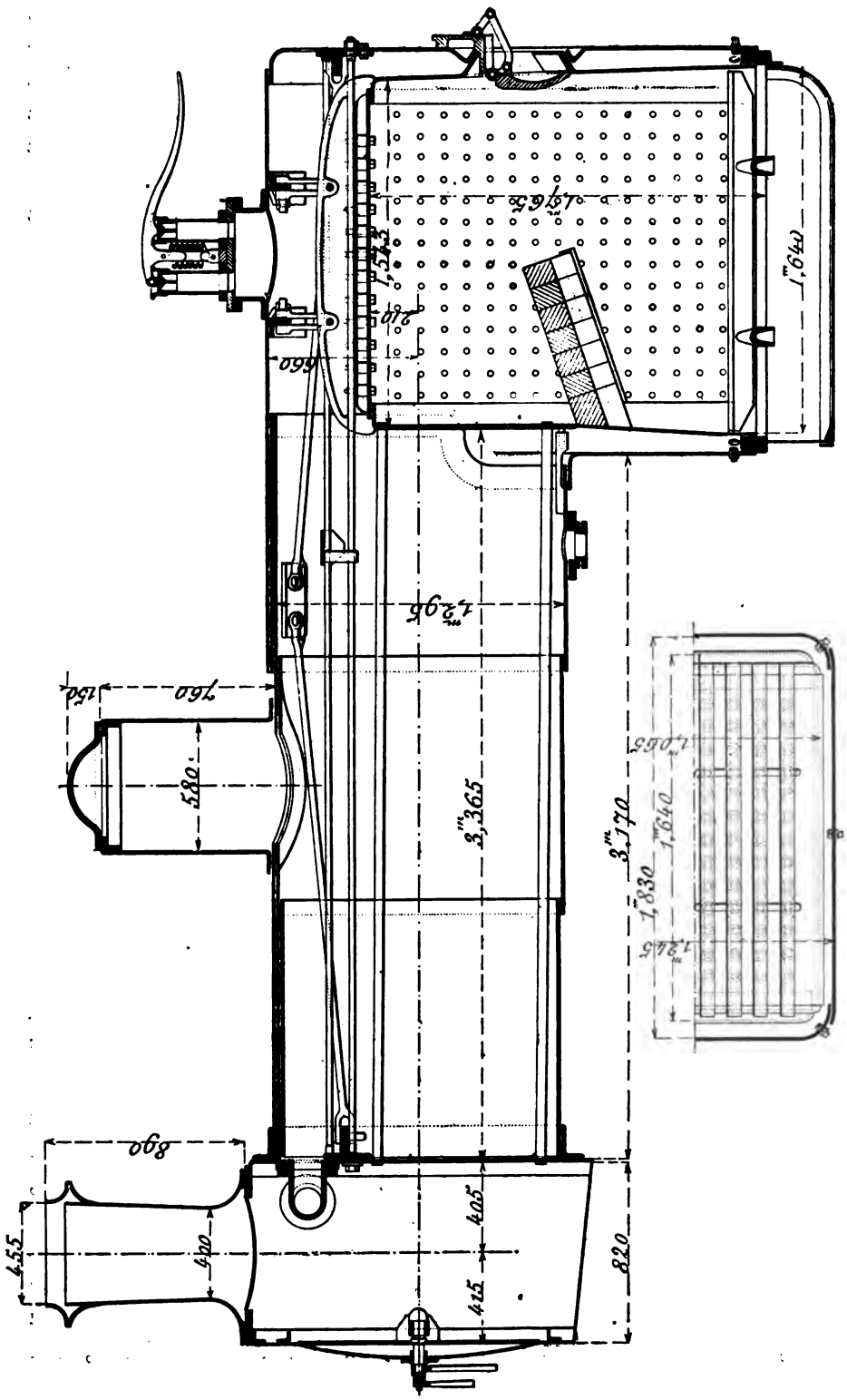


Fig. 310. — Type de chaudière à foyer profond (*Lancashire and Yorkshire Ry*).

l'entraînement d'escarbilles est beaucoup plus grand que dans des foyers très profonds parce qu'il ne se forme pas de remous et en raison de l'absence forcée de voûte en briques ; les escarbilles, collées sur les plaques par les scories encore pâteuses qui sont entraînées avec elles, forment souvent des nids d'hirondelles finissant parfois par boucher un grand nombre de tubes et qu'il faut parfois enlever au burin quand la machine est froide.

Ainsi, en principe, les foyers aplatis ne se prêtent ni à une marche très

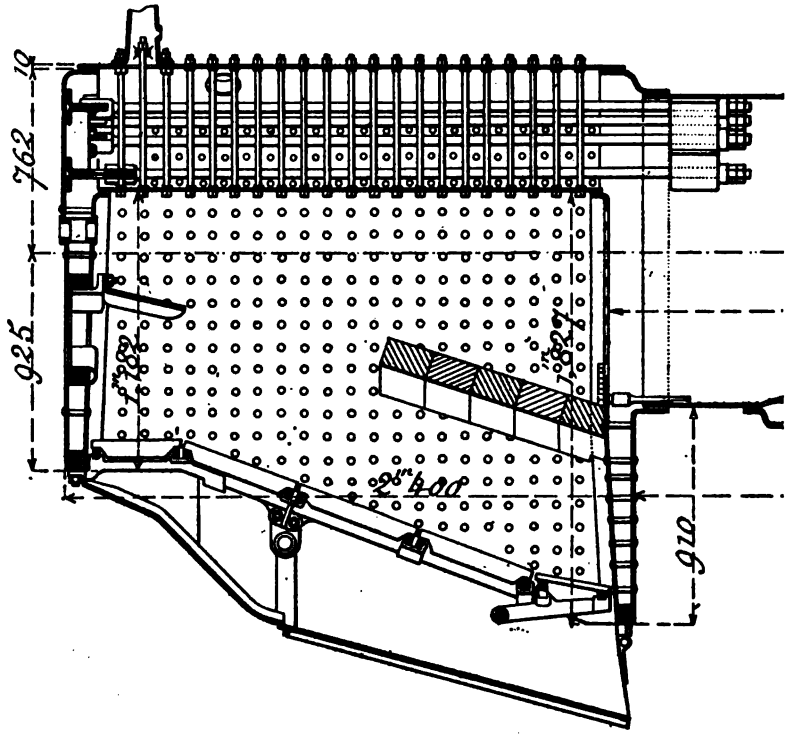


Fig. 311. — Type de foyer moyennement profond (*P.-L.-M.*).

économique, ni surtout à une combustion très active et ne sont pas avantageux sous le rapport de l'entretien. On ne s'est trouvé bien de leur emploi que sur les machines destinées à brûler des menus ou des anthracites et lorsque leur faible profondeur se trouvait compensée par une augmentation de la surface de grille suffisamment grande pour permettre une réduction très considérable de l'activité de la combustion. Encore, dans ces conditions, ne sont-ils pas toujours très économiques.

Avec des combustibles de nature et de qualités moyennes, on doit, à tout prix, surtout dans les machines express, éviter de donner aux foyers une profondeur insuffisante. Si la grille doit passer au-dessus d'un essieu accouplé, on incline le cadre vers l'avant, où l'on n'est pas limité, afin

d'augmenter la profondeur moyenne du foyer. Si l'essieu se trouve placé vers le milieu de la longueur du foyer on ne peut gagner beaucoup ainsi et il ne faut pas hésiter à relever l'axe de la chaudière.

Les foyers dits profonds (fig. 310) ont une hauteur intérieure à l'avant, du dessous du cadre au-dessous du ciel de 1,75 m. environ à 2,00 m., mais ils n'entrent véritablement dans cette catégorie que si leur cadre est peu incliné et si la profondeur est sensiblement la même à l'arrière. Les foyers moyennement profonds (fig. 311) ont une hauteur intérieure à l'avant de 1,45 m. à 1,80 m. Au-dessous de 1,45 m. environ, le foyer appartient à la

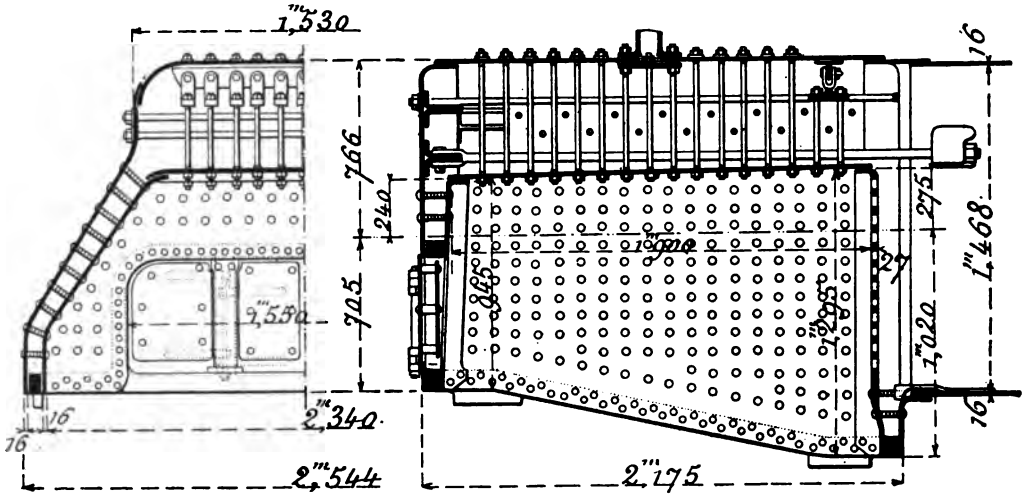


Fig. 312. — Type de foyer plat et élargi.

catégorie des boîtes à feu aplaties, surtout, ce qui se présente souvent, si le cadre remonte vers l'arrière. Certains foyers très plats (fig. 312), destinés à brûler des menus ou de l'anthracite n'ont guère qu'une hauteur moyenne intérieure de 1,00 m.

Nous verrons, dans un des paragraphes suivants, que l'on ne saurait comparer les foyers, sous le rapport de leur capacité de production, d'après les surfaces de grille qu'ils présentent sans tenir compte de leur profondeur.

172. Limite imposée au diamètre du corps cylindrique et procédés employés pour la reculer. — Le diamètre du corps cylindrique doit augmenter avec la puissance de la machine pour qu'il puisse contenir un nombre de tubes proportionnel à la quantité de calorique dégagée dans le foyer, afin que la surface de chauffe soit suffisante pour l'absorption de la chaleur produite et pour que la section libre de la tubulure soit en rapport avec le volume des gaz qui doit la traverser dans l'unité de temps. On ne peut indéfiment accroître la

longueur des tubes et, cela fût-il possible, on ne résoudrait qu'une partie du problème, la section de passage ne serait pas augmentée tandis que la résistance des gaz à travers le faisceau tubulaire, s'accroîtrait au contraire. Nous avons vu, dans un précédent chapitre, que l'allongement des tubes au delà d'une limite, souvent atteinte dans la pratique, réduisait la production en augmentant la perte par frottement et en réduisant, pour une pression donnée à l'échappement, l'activité de la combustion.

Dans les machines à marchandises montées sur des roues de faible diamètre, le diamètre du corps cylindrique n'est pas limité par l'écartement intérieur de ces roues à moins que l'on ne place la chaudière extrêmement bas. Il en est autrement dans les locomotives express dont les roues peuvent avoir un diamètre de 2,30 m. et même plus (machines anglaises à roues libres). On verra par l'examen de la figure 304 (2) que le diamètre du corps cylindrique, quand ce dernier est compris entre de très grandes roues, ne peut être supérieur à 1,27 m. extérieurement. On y a souvent remédié en mettant la plus petite virole par le travers des roues motrices et en télescopant le corps cylindrique vers l'avant. Toutefois, on ne peut accroître ainsi que le volume d'eau, la section minimum de la petite virole limitant le nombre des tubes.

Si le diamètre ainsi donné au corps cylindrique semble suffisant, la hauteur de la chaudière n'est plus limitée que par les essieux. Quand les cylindres sont extérieurs, il suffit de laisser entre l'essieu moteur et le dessous du corps cylindrique une distance convenable pour permettre le libre jeu vertical de l'essieu. Cependant, dans les locomotives les plus basses, par exemple les express de la *Compagnie d'Orléans* (voir fig. 21 à 23), on a été amené à placer la chaudière un peu plus haut qu'il ne serait nécessaire en vertu de cette seule considération, afin de donner au foyer une profondeur convenable. Avec des roues de 2,00 m. et une tonne de 1,26 m. de diamètre, on pourrait placer l'axe du corps cylindrique à une hauteur de 1,78 m., mais il est rare que l'on descende au-dessous de 1,95 m., parce que le foyer ne serait plus assez profond.

Quand les cylindres sont intérieurs, la hauteur minimum du corps cylindrique est imposée par la nécessité de laisser, sous la chaudière, le passage des manivelles de l'essieu coudé et des têtes de bielles (fig. 304) (2), en plus du jeu vertical de l'essieu. La chaudière, toutes choses égales d'ailleurs, sera d'autant plus haute que les coudes de l'essieu seront plus rapprochés, c'est-à-dire que l'entraxe des cylindres sera moins grand et la course des pistons plus considérable.

Le corps cylindrique, limité dans son diamètre à la cote que nous venons d'indiquer, serait encore suffisant pour permettre une augmentation notable de la puissance si l'on pouvait utiliser, pour y placer des tubes, la partie supérieure réservée à l'eau et à la vapeur qui occupe environ un tiers de sa

section. Partant de cette idée, M. Flaman, ingénieur principal des Etudes de la *Compagnie de l'Est*, a inventé un type ingénieux de chaudière (voir ci-dessus, § 167) qui a été appliqué par la même administration aux nouvelles locomotives express (type 800) et, comme chaudière de rechange, aux locomotives du type 500 et à une ancienne Crampton.

Le corps cylindrique est rempli de tubes jusqu'en haut et le ciel du foyer monte à peu près à la hauteur de la génératrice supérieure du corps cylindrique. Un second corps cylindrique, de plus petit diamètre, est placé parallèlement au-dessus du premier avec lequel il communique, par des tubulures et au moyen d'une vaste ouverture s'étendant sur toute la longueur de la boîte à feu, permettant le dégagement des bulles de vapeur produites autour du foyer et dans le faisceau tubulaire et qui vont se réunir à la partie supérieure du second corps formant chambre de vapeur. Le niveau moyen de l'eau se trouve à 0,44 en dessus du ciel.

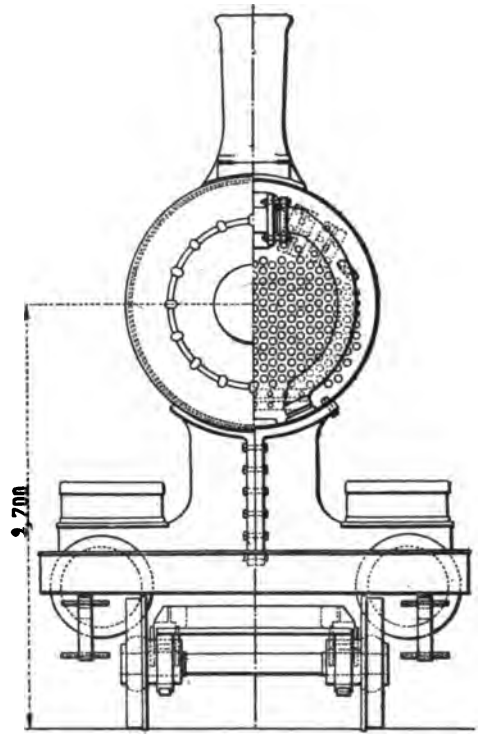


Fig. 313. — Figure ayant pour but de montrer la hauteur à laquelle se trouve la chaudière dans certaines locomotives américaines. Vue d'avant et demi-coupe dans la boîte à fumée des express du *Lehigh Valley R. R.*

Une autre solution, que l'on commence à appliquer dans la plupart des contrées et qui l'est, sur une grande échelle, par les Américains, consiste simplement à élever suffisamment le corps cylindrique pour le rendre indépendant des roues, ce qui permet de lui donner un diamètre en rapport avec la puissance à développer. M. Buchanan, ingénieur en chef du *New-York Central* est le premier qui ait osé pousser aussi loin ce principe; sa machine 999 (voir fig. 209), exposée à Chicago en 1893 et tirée dans la suite à de nombreux exemplaires, a été la première locomotive dans laquelle la hauteur du corps cylindrique ait atteint la cote de 2,73 qui a depuis été reproduite, mais n'a pas encore été surpassée sans que rien d'ailleurs autorise à dire qu'elle constitue une dernière limite.

Nous avons traité ailleurs cette question de la surélévation du centre de gravité et avons montré qu'elle ne paraissait offrir que des avantages du moins dans les limites actuellement atteintes, nous n'avons pas besoin d'y revenir ici. Rappelons seulement que la cote de hauteur d'axe du corps cylindrique

atteint aujourd'hui 2,50 m. dans beaucoup de machines européennes de construction toute récente (*North Eastern*, 2,50 m. ; *Ouest*, 2,40 ; *Midi et Nord*, 2,45 m. ; *État belge*, 2,52 m. ; *Etat autrichien*, 2,58) et s'élève fréquemment à 2,70 m. et 2,73 m. dans les locomotives américaines (fig. 313).

Quand les roues ont 2,00 m. de diamètre, il suffit de placer l'axe du corps cylindrique à une hauteur de 2,40 m. au-dessus du rail (fig. 304) (3) pour pouvoir donner à la tonne un diamètre de 1,40 m. ; en portant cette cote à 2,50 m., le diamètre du corps cylindrique peut s'élever à 1,50 m. Dès que la hauteur de l'axe atteint 2,65 m., on peut donner au diamètre une valeur très supérieure à celle qui pourrait jamais être nécessaire.

Les quelques considérations que nous venons d'exposer montrent que les limitations imposées à la locomotive ne sont pas si rigoureuses qu'on l'a cru longtemps ; il a suffi, pour les reculer, que la nécessité s'en fasse sentir.

173. Surface de grille. — Si toutes les locomotives brûlaient, dans des conditions identiques, un combustible de même qualité, la surface de grille constituerait la meilleure base que l'on puisse choisir pour comparer leur puissance. Cette condition est toutefois loin d'être réalisée dans la pratique au point que l'on est au contraire amené à considérer la surface de grille comme le moins comparable des éléments de la locomotive. Certaines de ces machines brûlent des combustibles de premier ordre, en roches ; certaines des charbons gras et bitumineux, d'autres des houilles maigres ou des anthracites ; dans les unes on se sert de briquettes dans la composition desquelles entrent des charbons divers ; dans les autres on brûle des mélanges ou des menus, soit même du poussier ; quelques-unes enfin, sur les lignes de banlieue, brûlent du coke. La tendance, partout ailleurs qu'en Angleterre, à utiliser des combustibles de moins en moins dispendieux, est très marquée depuis quelques années. C'est plus à cette tendance qu'à l'accroissement des puissances que l'on doit attribuer l'augmentation générale des surfaces de grille que l'on constate dans les locomotives construites depuis une dizaine d'années. Cette augmentation peut en effet avoir deux buts : ou accroître la puissance brute de la machine en brûlant par unité de temps une plus grande quantité de la même houille, ou produire une quantité de vapeur au moins égale avec un combustible de qualité inférieure.

La puissance dépend, non entièrement de la surface de grille, mais de la quantité de combustible brûlée par unité de temps. Il importe assez peu, au point de vue du résultat final, que cette quantité de combustible soit brûlée avec un tirage modéré sur une grande grille ou avec un fort tirage sur une grille de faible surface. Ainsi, une locomotive anglaise dans laquelle on brûle, en couche épaisse et en gros morceaux, du charbon du Pays de Galles ou du Derbyshire, pourra, avec une surface de grille de 1,70 m² à 1,80 m²,

développer le même travail qu'une machine du Continent, chauffée avec du tout-venant ou des menus, possédant une grille de 2,40 m², à la fois parce que l'on peut brûler plus de combustible par mètre carré de grille et que la puissance calorifique du combustible est supérieure. De même, nous l'avons vu, les locomotives express de la *Compagnie d'Orléans*, munies du foyer Ten Brinck et brûlant de la briquette de bonne qualité, peuvent remorquer, dans des conditions économiques, des trains lourds et rapides bien que leur surface de grille soit notablement inférieure à celle de la plupart des autres machines employées en France pour des services similaires.

La forme et la disposition des foyers a aussi une influence dont il faut tenir compte. A puissance égale, on considère que la surface de grille pourra être d'autant moins grande que le foyer sera plus profond. Les foyers profonds avec voûte en briques et rentrée d'air peuvent en effet permettre, économiquement, une combustion plus active que les foyers plats.

Ainsi, les compounds à grande vitesse de la *Compagnie du Nord* (2121-2157) qui ont le foyer profond avec une surface de grille de 2,04 m², sont beaucoup plus puissantes que les anciennes *Outrances* dont la surface de grille est de 2,31 m², mais dont le foyer est assez aplati. De même, les express à bogie de la *Compagnie de l'Ouest* (première série 953-962) sont capables de remorquer, à des vitesses plus grandes, des trains plus lourds que les machines antérieures à trois essieux (série 636 à 743) qui ont à peu de chose près la même surface de grille, mais dont les foyers sont peu profonds. La même Compagnie nous fournira d'ailleurs un exemple plus remarquable. En 1888, elle fit construire quelques machines à grande vitesse d'un nouveau type à trois essieux (Mach. 621 à 635) et à foyer profond plongeant entre les essieux accouplés, qui étaient considérées comme présentant un accroissement très notable de puissance, d'ailleurs vérifié par l'expérience, sur les locomotives de la série précédente à foyer plat, bien que la surface de grille fût descendue de 1,75 m² à 1,64 m².

Il ne saurait donc, en pareille matière, être question de chiffres absolus et avant de conclure, d'après les dimensions de leurs grilles, que telle ou telle machine est plus puissante que telle ou telle autre, on devra s'enquérir du type et des proportions du foyer, de sa profondeur, du mode de combustion adopté enfin et surtout de la nature du charbon que l'on y brûle. Faute de s'entourer de ces renseignements indispensables, on peut commettre une erreur d'appréciation, qui peut aller du simple au double.

Quelques administrations emploient, pour déterminer la surface de grille des formules empiriques, d'autres la basent sur la quantité de vapeur à produire par unité de temps et d'après le poids de combustible qu'il est possible de brûler par unité de temps et de surface de grille, certaines l'établissent en fonction de la surface de chauffe, mais la grande majo-

rité la détermine par comparaison avec les machines existantes et lui donnent la plus grande valeur qui semble possible dans les circonstances.

La Compagnie du *Nord-Ouest autrichien* détermine la surface de grille d'après les relations suivantes :

Le rendement d'une chaudière de locomotive se calcule au moyen de la formule

$$P = \left(\frac{350\ R + 1{,}5\ F}{w}\right) e$$

qui donne des résultats se rapprochant beaucoup de ceux obtenus en pratique.

R est la surface de grille en mètres carrés;

F la surface de chauffe en mètres carrés;

e est un coefficient dont la valeur dépend de la qualité du combustible employé et est indiquée au tableau ci-après :

NOMBRE de tours de roues à l'heure.	COMBUSTIBLE DE QUALITÉ			
	Inférieure.	Moyenne.	Bonne.	Supérieure.
4,000	4,7	5,7	6,7	7,2
8,000	5,3	6,3	7,3	7,8
12,000	5,9	6,9	7,9	8,4

w la consommation d'eau en litres, par heure et par cheval, savoir :

13,9 litres pour un diamètre de cylindre de 225 mm.
13,3 — — — 342 —
13,1 — — — 410 —
12,8 — — — 435 —
12,5 — — — 470 —

Au *Great Eastern* (Angleterre) on calcule la surface de grille d'après la formule

$$S = \frac{\text{Puissance indiquée}}{33}.$$

la surface S est exprimée en pieds carrés.

Sur le réseau du *Gothard* on emploie la formule :

$$S = \frac{1}{30}\left(\frac{N}{v}\right)$$

où N est la force en chevaux et *v* la vitesse du courant d'air d'alimentation, estimé entre 8 et 12 m.

La *Compagnie d'Orléans* emploie la relation

$$Q = \sqrt{560\, s\, S}$$

où Q est le poids de vapeur brute produit par heure; s la surface de grille; S la surface de chauffe totale. Cette relation a été déterminée expérimentalement par la Compagnie et se rapporte au système de foyers et à la proportion des tubes employés par elle. Pour la surface de grille on se rapproche autant que possible du rapport $s = \frac{S}{70}$ pour les locomotives à voyageurs et $s = \frac{S}{80 \text{ à } 90}$ pour les autres.

Aux chemins de fer de l'*État de Russie*, on détermine d'abord la surface de chauffe totale S d'après la formule

$$S = \frac{1}{19\,K} VT$$

où T représente l'effort de traction exprimé en kilogrammes, K le poids de vapeur produit par mètre carré de surface de chauffe et V la vitesse maximum, en service courant, en kilomètres à l'heure. Suivant le rapport existant entre les surfaces de chauffe directe et tubulaire, on donne à K une valeur comprise entre 48 et 60 kg. Le rapport de la surface de grille à la surface de chauffe varie de 60 à 80 pour les locomotives express et de 80 à 97 pour les machines à marchandises.

Aux chemins de fer de l'*État français*, on considère qu'un mètre carré de grille correspond à une puissance effective à la jante de 250 chevaux, en service courant.

Les administrations qui déterminent la surface de grille d'après la production nécessaire par heure, considèrent en général que la vaporisation est de 7 kg. par kg. de combustible et, suivant la nature du charbon employé ou le mode de chauffe adopté, que l'activité de la combustion moyenne par heure varie de 300 kg. à 500 et même 600 kg. par mètre carré de surface de grille.

En Angleterre, on part quelquefois du volume des cylindres et on ne donne jamais à la grille une surface inférieure à un pied carré par pouce de diamètre de cylindres.

Le plus souvent on procède par voie de comparaison. Un type de machines existant donne-t-il satisfaction, on le prend comme point de départ et on donne aux nouvelles locomotives une surface de grille proportionnée suivant la puissance à produire. Si la surface des anciennes machines semble trop faible, on l'augmente dans les nouvelles constructions; il en sera de même si l'on doit employer un combustible de moins bonne qualité.

Aujourd'hui, on s'attache en général à donner à la grille la plus grande surface possible. Si le foyer est profond et descend entre les deux essieux accouplés arrière, dont l'écartement maximum a été jusqu'ici de 3,00 m. la

plus grande surface de grille qu'il soit possible d'établir est de 2,30 m², quand les cylindres sont intérieurs, et de 2,70 m², quand ils sont extérieurs. Pour ce qui est des limites imposées aux dimensions des foyers et des grilles, nous renvoyons au paragraphe où nous avons traité cette question.

Quand le foyer passe au-dessus de l'essieu arrière, la surface de grille peut sans inconvénient être portée à 2,70 m² et même exceptionnellement à 3,00 m². Pour aller plus loin dans cette voie comme les Belges et les Américains, il est nécessaire de faire passer la grille par-dessus les roues arrière; on peut alors lui donner une surface de 7 à 8 m², mais le foyer, nécessairement très plat, ne convient qu'à la combustion de charbons maigres ou de menus.

Le tableau ci-dessous montre l'accroissement relatif de la surface de grille dans les locomotives de la *Compagnie du Nord*, depuis surtout que l'on a remplacé la gailleterie ou la briquette, autrefois employées, par des mélanges contenant une majorité de menus :

SÉRIE DE MACHINES	RAPPORT de la surface de la grille à la surface de chauffe.	
	Séries anciennes.	Séries nouvelles.
Locomotives express	»	1/42
— compound à grande vitesse	»	1/54
— tramways	»	1/54
— mixtes	1/60	1/54
— dites de banlieue	1/80	1/56
— à 3 essieux accouplés, type Nord	»	1/42
— Mammouth à 3 essieux accouplés	1/79	1/44
— à marchandises (4 essieux accouplés)	1/70	1/60
— Wolff à marchandises	»	1/60
— tenders à marchandises	1/82	1/73

On constate dans presque tous les pays une tendance analogue à accroître la surface de grille. Les locomotives à grande vitesse récemment construites sur le continent européen ont rarement une grille de surface inférieure à 2,00 m², comme on pourra s'en assurer par l'examen des tableaux annexés à cet ouvrage. Les nouvelles machines express construites pour les Compagnies de l'*Ouest*, du *Nord*, de *P.-L.-M.*, du *Midi* et de l'*Est* ont des surfaces de grille variant de 2,30 m² à 2,40 m² en nombres ronds.

Les machines anglaises à grande vitesse les plus récentes ont des grilles à peu près équivalentes étant données la qualité du combustible brûlé, soit de 1, 90 m² à 2,00 m².

La surface de grille des nouvelles locomotives express varie de 2,10 m² à 2,30 m² en Allemagne; de 2,30 m² à 2,90 m² en Autriche; de 2,00 m² à 2,35 m² en Italie; aux États-Unis elle atteint jusqu'à 3,20 m² dans les machines destinées à brûler des charbons bitumineux.

Enfin, dans les locomotives à foyer débordant les roues, destinées à brûler soit des menus, soit des anthracites, la surface de grille atteint jusqu'à 6,86 m² en Belgique et 8,30 m² aux États-Unis.

On trouvera dans les tableaux ci-dessous quelques chiffres absolus et relatifs concernant les chaudières des principaux types de locomotives actuellement usités.

On a beaucoup discuté dans ces dernières années la question de la surface de grille et beaucoup d'ingénieurs ne sont pas partisans des très grandes surfaces, leur reprochant d'alourdir les machines, de rendre la chauffe plus pénible et l'allure peu économique. Cependant, à mesure que l'on a plus d'expérience des grands foyers, les objections semblent tomber une à une. Sans aller aussi loin dans cette voie que les Belges et les Américains, qui d'ailleurs l'ont fait pour utiliser des combustibles inférieurs ou spéciaux, on doit considérer que l'accroissement de la surface de grille est le plus efficace de tous les procédés capables d'augmenter la puissance des machines, et cela sans augmenter le poids en proportion. Pour nous borner à la pratique récente des Compagnies françaises, l'expérience semble prouver que l'accroissement modéré et rationnel de la surface de grille, réalisé dans ces dernières années, est accompagné de nombreux avantages; la puissance nécessaire s'obtient au prix de moins d'efforts et d'attention, d'un surmenage moins considérable des chaudières; le tirage est plus doux et la marche plus économique[1]. Quand on a une fois adopté des surfaces de grille largement proportionnées, on ne revient plus aux petits foyers, à la satisfaction générale des mécaniciens.

D'autre part, il faut se garder de toute exagération en ce qui concerne la détermination de la surface de grille et la calculer non pas d'après l'effort maximum que pourra avoir à développer toute machine considérée pendant un court instant, mais d'après son travail moyen. Il est préférable d'avoir à forcer un peu l'allure dans les circonstances exceptionnelles que de donner à une locomotive une grille exagérée pour sa puissance. Si en effet la surface de la grille est disproportionnée au travail normal qu'on doit lui demander, la machine peut être plus lourde et plus coûteuse d'établissement qu'il n'est nécessaire; en outre, un certain degré de combustion est nécessaire pour que le feu ne s'éteigne pas lors des stationnements ou à la descente des pentes, et la dépense sera plus forte de ce fait avec une grande qu'avec une petite grille, d'autant plus que les pertes extérieures par rayonnement et convection seront elles-mêmes plus considérables par suite de l'augmentation des surfaces exposées au refroidissement.

[1] Nous renvoyons, en ce qui concerne les avantages résultant de la réduction de l'activité de la combustion, à ce que nous avons dit dans le chapitre consacré à l'étude de la *Combustion et de la Vaporisation*.

Nous sommes sans doute encore dans une période de transition; et il ne serait pas étonnant que d'ici peu d'années on arrive à donner en France aux grilles des locomotives express ou de celles qui sont destinées au service des trains rapides et lourds, des surfaces de 2,70 m² à 3,00 m². Ce sera probablement le seul moyen de mettre la locomotive à la hauteur des exigences futures du trafic; les Anglais ont trouvé la solution du problème dans le fractionnement des trains et dans l'augmentation de leur nombre plutôt que de leur poids, mais c'est là une tendance qui semble, pour le moment, leur être particulière et dont les circonstances les obligent peu à peu à s'écarter.

174. Surface de chauffe. — La surface de chauffe n'a pas, en général, suivi la même progression que la surface de grille, à la fois parce que l'accroissement de cette dernière a eu dans bien des cas pour but de permettre l'emploi de combustibles inférieurs et non de dégager plus de calories par unité de temps et, dans d'autres cas, parce que cette surface était plutôt un peu exagérée dans certains types de machines relativement à la surface de grille, ce qui pouvait permettre sans inconvénients une diminution du rapport de ces deux surfaces. Il faut ajouter qu'entre certaines limites, l'augmentation de la grille est plus facile à réaliser que celle de la surface de chauffe.

Bien qu'à première vue il n'en soit pas ainsi, on arrive finalement à cette conclusion que la surface de chauffe offre un plus sûr élément de comparaison de la puissance des machines que la surface de grille. Si l'on admet en effet que les locomotives soient également bien proportionnées, ce qui malheureusement n'est pas toujours vrai, on élimine en se basant sur la surface de chauffe, l'influence du combustible, de la forme et des proportions du foyer, du mode de chauffe ; la transmission de la chaleur à travers les parois obéit au contraire à des lois renfermant peu d'éléments variables. Il y a toutefois lieu de considérer à part les machines à tubes exceptionnellement longs, qui ne peuvent guère se comparer aux autres locomotives, le mètre carré moyen de leur surface ayant une plus faible activité de vaporisation.

Dans les machines express construites en France dans ces dernières années, la surface de chauffe ne dépasse pas 145 m² quand les tubes sont lisses, à l'exception des machines de l'*Est* à chaudière Flaman (168,29 m²) et 155 m² avec des tubes Serve.

La proportion de la surface de chauffe dans les machines récentes a d'ailleurs été traitée en détail dans le chapitre réservé à l'étude des différents types de locomotives.

En Angleterre, où l'on n'emploie les tubes Serve que sur une échelle des plus restreintes, la surface de chauffe ne dépasse jamais 140 m² et reste ordinairement voisine de 120 m². Les mêmes chiffres s'appliquent aux loco-

motives allemandes. En Autriche, on a construit récemment des locomotives express ayant, avec des tubes lisses, une surface de chauffe de 140 à 150 m². En Suisse et dans la plupart des autres pays de l'Europe, une surface de 140 m² paraît un maximum rarement atteint.

Aux Etats-Unis, où les locomotives sont plus puissantes que partout ailleurs, une surface de chauffe de 140 m² est au contraire un minimum ; pour les machines express récentes la proportion usuelle oscille aujourd'hui autour de 180 m² et atteint parfois 200 m² (tubes lisses).

On trouvera, dans les tableaux ci-après, les proportions usuelles de surfaces de chauffe et de grille et leur rapport mutuel. Ce dernier, on le verra, varie dans les plus grandes limites, depuis 1/20 pour les machines à très grand foyer et à tubes de longueur modérée, jusqu'à 1/80 pour les locomotives de la *Compagnie d'Orléans* à foyers plutôt petits et à tubes très longs. Les premières, il est vrai, ne brûlent que 250 à 300 kg. de charbon en plus par mètre carré de grille et par heure, tandis que les dernières brûlent parfois plus de 500 kg. On arriverait à des chiffres beaucoup plus comparables si l'on rapportait la surface de chauffe au poids de vapeur produit par heure et par unité de surface de chauffe.

175. Hauteur du ciel du foyer au-dessus de l'axe de la chaudière. — La hauteur du ciel au-dessus de l'axe de la chaudière est une cote importante d'où dépend en partie le nombre des tubes que l'on peut placer dans la chaudière, nombre d'autant plus grand, toutes choses égales d'ailleurs, que le ciel se trouve plus relevé.

La hauteur du ciel est limitée par la nécessité de ménager, au-dessus du niveau moyen de l'eau dans la chaudière, une chambre de vapeur de capacité convenable et de marcher en outre avec une hauteur d'eau suffisante pour que le ciel ne soit découvert à aucun moment, par suite d'un arrêt brusque par exemple ou à la descente d'une pente. On admet en général que le niveau normal, la machine se trouvant sur un plan horizontal, doit être de 0,10 m. au moins.

Quand la boîte à feu est fortement renflée, on peut relever un peu le niveau moyen de l'eau et le ciel du foyer, la hauteur de l'espace libre au-dessus du ciel, dans la région de production maximum, restant suffisante. En règle générale, afin de mieux utiliser la place disponible, et pour disposer un nombre de tubes aussi grand que possible, on tient la hauteur du ciel au-dessus de l'axe de la chaudière à la cote qui semble le maximum admissible dans les circonstances et qui varie naturellement en fonction du diamètre du corps cylindrique. On trouvera ci-après un tableau donnant la hauteur du ciel au-dessus de l'axe de la chaudière dans quelques machines françaises et étrangères de construction récente.

Hauteur du ciel du foyer au-dessus de l'axe de la chaudière.

DÉSIGNATION DES MACHINES	HAUTEUR du dessous du ciel au-dessus de l'axe du corps cylindrique.	DIAMÈTRE moyen du corps cylindrique.
	Mètres.	Mètres.
Ouest. Machines 963-990	0,190	1,253
— 2301-2304	0,200	1,500
Nord. Machines 2121-2157	0,200	1,218
Est. Machines 693-704 et 1 000	0,210	1,430
P.-L.-M. Machines C. 21-60	0,243	1,291
P.-O. Machines 51-86	0,180	1,250
Grand central belge. Marchandises	0,215	1,200
Great Eastern. Express	0,214	1,260
Lancashire et Yorkshire. Tous les types	0,210	1,295
Great Western. Express, type 1893	0,200	1,270
Caledonian. Express, type 1895, Dunalastair	0,315	1,420
Schenectady Loco. Works. Marchandises, 1894	0,315	1,410

176. Largeur des lames d'eau. — On doit donner aux lames d'eau une largeur aussi grande que possible afin que la circulation de l'eau autour et contre les parois du foyer s'opère efficacement, ce qui active la vaporisation et s'oppose à la formation de chambres de vapeur susceptibles d'entraîner la détérioration rapide des flancs du foyer par surchauffage. On est malheureusement parfois conduit, dans la pratique, soit pour réduire le poids, soit pour accroître la surface de grille sans augmenter les dimensions extérieures de la boîte à feu, particulièrement dans les machines dont le foyer plonge entre deux essieux accouplés, à contrevenir un peu à ce principe.

Ordinairement, l'épaisseur des lames d'eau, à la partie inférieure, ou, ce qui revient au même, la largeur extérieure du cadre du foyer, varie de 0,050 m. à 0,070 m. ; exceptionnellement, cette cote descend jusqu'à 0,040 m. (*Great Western*) ou s'élève jusqu'à 0,100 m. Dans les machines américaines, on se tient entre 0,075 m. et 0, 095 m.

Les quatre lames d'eau n'ont pas nécessairement la même épaisseur ; celle de l'avant est quelquefois un peu plus large que les autres.

Pour faciliter la production et le dégagement des bulles de vapeur on incline chaque fois qu'on le peut les parois du foyer vers l'intérieur, de telle sorte que les lames d'eau présentent, à leur partie supérieure, une largeur plus grande d'au moins un tiers qu'au niveau du cadre.

177. Faisceau tubulaire. — Nous n'avons pas à revenir ici en détail sur les proportions des tubes à fumée qui ont fait l'objet d'une étude spéciale dans le chapitre relatif à la vaporisation des chaudières. Il nous suffira pour le moment de rappeler que le diamètre extérieur des tubes, quand ils sont lisses, varie de 40 à 52 mm. et leur longueur de 3,20 m. à 5,00 m. environ. Les chaudières dans lesquelles la longueur du faisceau est inférieure à

3,50 m. sont considérées comme à tubes courts ; les tubes de 3,50 m, à 4,00 m. appartiennent à la catégorie des tubes de longueur moyenne ; au-dessus de 4,50 m. ils rentrent dans celle des tubes longs. Avec les diamètres usuels de 38 à 50 mm. l'expérience semble prouver que les longueurs de 3,50 m. à 4,00 m. sont les plus convenables, celles qui réunissent à la fois les conditions propres à assurer un régime économique et une production facile.

Le diamètre des tubes à ailettes varie ordinairement de 65 à 70 mm. et leur longueur peut, sans inconvénients, descendre jusqu'à 3,00 m. et même un peu au-dessous.

Nous verrons plus loin que, dans beaucoup de locomotives construites sur le continent européen, on a souvent donné aux tubes une longueur supérieure à celle qui serait nécessaire pour assurer une vaporisation économique, afin d'augmenter le volume d'eau contenu dans la chaudière, mais c'est une pratique à laquelle on n'attache plus autant d'importance.

Le nombre et le diamètre des tubes doivent être calculés de manière à présenter non seulement une surface de chauffe, mais aussi une section de passage, pour les produits de la combustion, qui soit en rapport avec la puissance de la machine. Cette section ne doit pas être nécessairement proportionnelle à la surface de grille mais à la quantité de combustible qui est brûlée par unité de temps dans le foyer ; aussi offre-t-elle une valeur sensiblement égale dans des locomotives ayant des surfaces de grille très différentes, par exemple dans des locomotives anglaises présentant une surface de grille de 1,80 m² et dans les machines de l'*Etat belge* à foyer élargi possédant une grille de plus de 5,00 m². C'est qu'en somme les deux types sont à peu près équivalents sous le rapport de la production et brûlent dans le même temps une quantité équivalente de combustible.

On trouvera, dans les tableaux qui accompagnent ce chapitre, des données numériques relatives aux tubes de nombreux types de locomotives récentes.

178. Forme et proportion des cheminées. — Si l'on s'en rapportait simplement à la pratique courante, on pourrait être amené à conclure que la forme et les proportions des cheminées n'ont pas, dans les limites usuelles, une influence bien marquée sur la production du tirage et l'utilisation de la vapeur d'échappement. Certaines Compagnies (à l'étranger particulièrement) ont adopté un type uniforme de cheminée pour toutes leurs machines ; ces cheminées, approvisionnées d'avance en magasin, servent indifféremment de rechange pour les locomotives de toutes catégories.

De nombreuses et intéressantes expériences, effectuées en vue de rechercher l'influence des différents éléments et d'obtenir des chiffres ou des relations précises à ce sujet, ont donné des résultats parfois fort peu concordants et que la pratique n'a pas toujours vérifiés. Le problème renferme

en effet un grand nombre de variables dont certaines parfois indéfinies qui le rendent extrêmement complexe.

Les éléments, indépendants de la nature du combustible, du type de foyer et du mode de chauffe, de la section et de la longueur du faisceau tubulaire sont surtout :

a. Le rapport de la hauteur à la section minimum de la cheminée ;

b. La section de la cheminée à la base ;

c. La section de la cheminée à la partie haute ;

d. La section de la tuyère d'échappement ;

e. La distance séparant le plan supérieur de la tuyère de la base de la cheminée.

Ces importantes questions ont été, depuis l'origine de la locomotive, l'objet de recherches pratiques et expérimentales, particulièrement de la part de Pambour, Le Châtelier, C. Polonceau, Clark, Zeuner ; de MM. Nozo et Geoffroy, Prussmann et Grove. Enfin, de 1892 à 1894, une série très importante d'expérience, a été effectuée en Allemagne, à Hanovre, sous la direction de M. von Borries.

Si l'on excepte ces dernières recherches, encore trop récentes pour avoir eu une influence marquée, on peut dire que la pratique des différents pays constitue plus ou moins un compromis entre les indications de ces expériences et celles relevées en service courant.

Le but à atteindre en proportionnant convenablement les cheminées et les tuyères d'échappement consiste d'abord à obtenir le tirage le plus intense pour une pression minimum devant le piston ; ensuite à éviter, dans toute la mesure possible, l'entraînement des escarbilles, pour un type donné de combustible.

Un des éléments les plus importants des proportions des cheminées, la hauteur, n'est pas susceptible de variations importantes, un maximum étant imposé, d'un côté par le gabarit, de l'autre par la hauteur de l'axe de la chaudière et le diamètre de la boîte à fumée. Dans les anciennes machines, très basses, elle pouvait atteindre 1,90 m. avec le gabarit usuel en France, tandis qu'elle n'est plus que de 1,00 m. dans quelques nouvelles locomotives. En Angleterre, certaines machines récentes ont des cheminées dont la hauteur n'excède pas 0,55 m. On peut d'ailleurs accroître la longueur utile de la cheminée en la prolongeant vers le bas à l'intérieur de la boîte à fumée, jusqu'au niveau de la rangée supérieure des tubes ; c'est une ressource à laquelle on a déjà recours dans beaucoup de machines et qui sera d'autant plus précieuse que l'on remontera davantage l'axe des chaudières.

Les cheminées légèrement tronconiques (inclinaison environ 1/12, la grande base se trouvant à la partie supérieure, sont considérées comme un peu plus avantageuses que les cheminées cylindriques sans que l'on ait constaté en service d'avantage bien marqué. Ce sont les plus répandues aujour-

d'hui. Sur les réseaux français de l'*Ouest* et du *Nord*, en Angleterre, aux Etats-Unis, on donne aux cheminées une conicité très faible. A la *Compagnie de l'Est*, en Allemagne, en Russie, d'après les indications de Prüssmann, on accentue davantage la conicité, de manière à rapprocher l'inclinaison des génératrices de celles de la veine d'échappement.

Les relations existant entre la section de la cheminée et celle de la grille de la tuyère d'échappement et entre l'intensité du tirage et l'efficacité du jet d'échappement, sont encore mal connues et définies : le problème est d'ailleurs extrêmement complexe.

Entre certaines limites, la valeur de la section de la cheminée ne paraît pas jouer un rôle très important; des locomotives de même puissance, brûlant pendant le même temps une quantité égale de combustible, possèdent des cheminées dont la section varie dans de grandes proportions. La réduction et l'augmentation de la section de la cheminée, au delà des proportions usuelles, ont sensiblement le même effet : une diminution du tirage provenant, quand le diamètre est trop petit, de ce que la section est insuffisante pour débiter, à la vitesse que peut communiquer à la masse gazeuse la vapeur d'échappement, un volume suffisant des produits de la combustion; quand le diamètre est trop considérable, d'une diminution de la vitesse des gaz. En principe, la section de la cheminée peut être plus faible quand la pression à l'échappement et par conséquent la vitesse de la veine de vapeur sont plus grandes; c'est le cas des locomotives américaines qui marchent normalement avec une faible détente et dont les échappements sont très violents. Certaines locomotives construites aux États-Unis, dans lesquelles la surface de grille atteint de 2,80 m² à 3,00 m² ont des cheminées dont le diamètre n'excède pas 0,390 m. Quand la vitesse du jet d'échappement est réduite comme dans les locomotives fonctionnant avec une forte détente, il convient d'augmenter un peu la section pour que le débit soit suffisant.

Il semble pourtant que la section des cheminées est fréquemment trop faible et que l'on a intérêt, tant au point de vue de la production régulière que de l'économie, à lui donner une assez grande valeur.

Les relations existant entre la section de la cheminée et celle de la tuyère d'échappement, entre ces dernières et l'intensité du tirage ou l'entraînement du combustible n'ont rien d'absolu. Il semble que ce soit une erreur de penser que l'arrachement du combustible, aussi bien qu'un excès de contre-pression dans les cylindres, accompagnent nécessairement l'emploi d'échappements serrés. C'est ce qu'ont très bien fait ressortir les intéressantes expériences effectuées de 1892 à 1894 par les Chemins de fer de l'*Etat prussien* (Direction de Hanovre)[1].

[1] *Die Eisenbahn-Technick der Gegenwart*, par MM. Von Borries, Blum et Barkhausen.

Dans ces expériences, on a constaté l'exactitude des lois de Clark et de Zeuner établissant, entre la dépression dans la boîte à fumée mesurée en colonne d'eau et la pression dans le tuyau d'échappement mesurée en hauteur de mercure, une relation déterminée, mais avec des coefficients un peu différents de ceux que ces savants avaient indiqués, soit 0,80 à 1,06 au lieu de 1 à 1,20.

La forme du jet d'échappement et celle de la cheminée ont une influence marquée sur le rendement et la production du tirage. Pour que l'aspiration des gaz se produise convenablement, la vapeur d'échappement doit se mélanger assez complètement à eux; le jet doit remplir autant que possible la cheminée et s'épanouir à la sortie de l'orifice.

La vitesse verticale du jet de vapeur doit provenir de la pression régnant à la partie basse de la colonne d'échappement, la tension dans le plan de l'orifice étant suffisante pour donner l'épanouissement nécessaire au jet. Pour une section donnée de la tuyère, la vitesse verticale du jet au-dessous de cette dernière est d'autant plus grande que le diamètre de la colonne d'échappement est plus faible, ce qui, en diminuant la tension dans le plan d'orifice, a pour effet de réduire l'épanouissement de la veine de vapeur. On doit, pour remédier à cet inconvénient, diminuer aussi la section de la cheminée, ou provoquer l'épanouissement du jet, comme dans les expériences de l'*Etat prussien*, à l'aide d'une barrette rectangulaire placée à cheval sur la tuyère.

La réduction de la section des tuyères d'échappement a pour effet de régulariser et de prolonger la période d'échappement et par conséquent, entre certaines limites, de diminuer le soulèvement du combustible dans le foyer, malgré la plus grande vitesse de la veine, si les proportions choisies d'autre part sont convenables. Toutefois, en raison de l'accroissement de vitesse, le rendement de la cheminée est plus faible. Cette réduction de section de la tuyère ne produit pas, comme on est souvent tenté de le croire, une augmentation sensible de la contre-pression devant les pistons, du moins aux vitesses moyennes, comme l'ont démontré de nombreux relevés effectués au cours des expériences dont nous parlons. En effet, *la pression dans la colonne d'échappement ne représente qu'une faible portion de la contre-pression dans les cylindres.*

Les cheminées fortement étranglées vers le bas et d'une grande conicité, favorables au rendement du jet, ont pour effet de causer l'arrachement du feu, l'entraînement des escarbilles et de rendre l'allure de la combustion irrégulière. Elles se prêtent donc mal aux forts tirages, surtout avec des combustibles menus ou légers sur la grille. En effet, la vapeur d'échappement s'y mélange bien avec les gaz, mais chaque coup d'échappement agit comme un piston dans la partie étranglée du bas et produit une brusque aspiration des gaz qui soulève le feu. Quand la conicité est peu accentuée et la section un

peu plus grande, l'action de l'échappement est moins brutale. A la suite des expériences dont nous avons parlé, l'*Etat prussien* a adopté un type de cheminée moins conique et de plus grande section que celui qu'il employait depuis plusieurs années et qui avait été établi d'après le résultat d'expériences antérieures et de calculs. Comme il arrive si souvent dans les questions de mécanique appliquée, l'expérience a donné raison aux ingénieurs qui, repoussant les idées de théorie pure, se sont laissés guider par la pratique et par des indications empiriques.

D'après M. von Borries, les cheminées de grande section combinées avec des échappements serrés peuvent être préférables aux cheminées étroites avec échappements larges, tout au moins pour des conditions moyennes et, sauf en ce qui concerne les locomotives à grande vitesse dont les chaudières sont timbrées à une pression élevée. Ce serait aussi seulement pour ces machines que les échappements annulaires et autres présenteraient quelque avantage.

Dans les cheminées à double cône, la hauteur du cône supérieur doit être, d'après les expériences de l'*État prussien*, les 0,60 au moins de la distance comprise entre l'orifice du tuyau d'échappement et le haut de la cheminée. Si on ne peut donner à la cheminée une hauteur suffisante, on peut réduire son diamètre ainsi que celui de la tuyère d'échappement.

M. von Borries indique la modification suivante de la formule de Grove pour le calcul du diamètre de la tuyère d'échappement supposée circulaire.

$$d = 0{,}156 \sqrt{\frac{S\,R}{S + 0{,}3\,R}},$$

où d est le diamètre cherché, en mètres, R la surface de grille, S la section des tubes, en mètres carrés.

Le même ingénieur conseille les proportions suivantes :

$$h = 13\ d$$
$$D = 4{,}2\ d$$

quand les tuyaux d'échappement sont coudés et se bifurquent près de la tuyère, et

$$h = 14\ d$$
$$D = 3{,}8\ d$$

quand la colonne d'échappement est verticale sur une certaine hauteur,

h = hauteur de la cheminée au-dessus de la tuyère d'échappement;

D = diamètre supérieur et maximum de la cheminée.

On trouvera ci-dessous les dimensions des cheminées de quelques types de machines connus. Nous n'avons pas fait figurer, par comparaison, la surface de grille qui peut être très variable pour de mêmes quantités de charbon brûlées par unité de temps.

DÉSIGNATION DES MACHINES	DIAMÈTRE intérieur de la cheminée. En bas.	En haut.
	Mètres.	Mètres.
Ouest. Machines mixtes à bogie. 2301-2304	0,450	0,520
Est. Machines express à bogie, type 800	0,402	0,552
— de banlieue, 613-742	0,356	0,506
— à marchandises, 1 000	0,425	0,506
P.-L.-M. Machines express compound, C. 21-60	0.540 (cyl.)[1]	
— express B. 111-400	0,500 —	
— compound à 8 roues accouplées, 3211-3362	0,540 —	
P.-O. Machines express, 77-86	0,410	0,484
— — 103	0,450	0,514
— à marchandises. 942-986	0,450	0,520
— de banlieue, 2168-2200	0,452	0,517
Nord. Machines express compound, 2121-2137	0,400	0,480
Midi. Machines : 6 roues accouplées et à bogie	0,460	0,520
North Eastern. Machines express, types Q et Q_1	0,355 0,380	0,415 0,440
Midland. Machines express à bogie	0.410 (cyl.)	
Great Western. Machines mixtes à bogie	0,330 —	
Great Northern. Machines express à roues libres	0,360	0,440
Etat autrichien. Machines express à bogie	0,400	(?)
Etat danois. Machines express à bogie	0,420	0,508
Union suisse. Machines Mogul	0,395	0,460
Etats-Unis. Pour les machines récentes	0,350 à 0,450	0,390 à 0,490

[1] Avec noyau intérieur.

179. Volume d'eau et de vapeur. — La quantité d'eau contenue dans la chaudière de la locomotive n'a rien à voir avec la puissance moyenne de la machine, mais joue un rôle assez important comme régulateur de la production d'énergie. L'allure du feu ne peut être, soit parfaitement régulière, soit toujours en rapport direct et immédiat avec la dépense, malgré l'action automatique de l'échappement. L'eau qui se trouve contenue dans la chaudière intervient alors en quelque sorte comme un volant pour absorber ou restituer successivement le calorique suivant qu'il est produit ou consommé en excès.

En principe, l'importance du volume d'eau n'a aucun effet sur le travail développé, aussi longtemps que cette eau d'alimentation est fournie au fur et à mesure des besoins. L'eau n'est qu'un fluide intermédiaire dont l'emploi est nécessaire pour transformer, en énergie mécanique, l'énergie calorifique développée dans le foyer. C'est des quantités de charbon brûlé ou de vapeur produite par unité de temps que dépend la puissance de la machine. Si donc le travail à produire, l'activité de la combustion dans le foyer et l'afflux de l'alimentation étaient parfaitement réguliers et continus, il importerait assez peu que le poids d'eau enfermé dans la chaudière soit très faible ou très considérable. L'équilibre entre la production et la dépense étant complet, l'échange calorifique entre les surfaces de chauffe et l'eau serait à

tout instant identique à la quantité de chaleur emportée par la vapeur qui s'écoule vers les cylindres et la pression dans la chaudière resterait constante quel que soit le volume d'eau. On obtient un semblable régime par exemple avec les moteurs Serpollet dont le serpentin formant chaudière ne contient à la fois qu'un volume d'eau sensiblement égal à celui qui, réduit en vapeur, correspond à une cylindrée. C'est exactement le fonctionnement contraire à celui des locomotives sans foyer.

Les conditions de la pratique sont très différentes de celles que nous avons énoncées ci-dessus, surtout en ce qui concerne les locomotives. Le travail de ces machines est essentiellement variable, l'alimentation ne peut être parfaitement continue ou proportionnée strictement aux besoins, et la chauffe procède fatalement par à-coups; la température du foyer passe par un minimum et par un maximum entre les chargements successifs du combustible et ce sont précisément ces chutes de température dans le foyer que les bons mécaniciens s'attachent à réduire en exigeant que le chargement du feu soit fait méthodiquement et souvent, par petites quantités à la fois. D'autre part, l'approvisionnement d'eau de la chaudière, assez considérable par rapport à celui qui est vaporisé par unité de temps, parfois presque égal à la production totale pendant une heure, a pour effet de pallier à une insuffisance momentanée de la production par rapport à la dépense.

Le jeu de l'échange de calorique produisant l'effet régulateur dont nous parlions plus haut, repose sur une propriété connue de la vapeur saturée. Lorsque, le régime normal étant établi, et l'eau de la chaudière se trouvant portée, dans toute sa masse, à une température correspondant à la pression de marche, on vient à accroître la dépense de vapeur, il se produit un léger abaissement de pression. Dès lors la masse liquide, dont la température se trouve supérieure à celle du point d'ébullition correspondant, entre immédiatement en ébullition et se transforme partiellement en vapeur, masquant ainsi le déficit résultant de l'excès de la dépense. Pourvu que ce déficit provenant soit d'un accroissement de travail produit, soit d'une diminution de l'activité du feu, ne se prolonge pas, la quantité d'eau contenue dans la chaudière, agissant comme un régulateur, suffit à le combler.

Si, d'autre part, la dépense de vapeur diminue, l'activité de la combustion n'étant pas interrompue, la pression ne tend à s'élever que lentement parce que l'excès de chaleur produit par le foyer est employé à échauffer la masse d'eau dont la température doit monter avec la pression. L'énergie correspondante est ainsi accumulée dans la chaudière où, à part une légère perte due au rayonnement extérieur, elle reste intégralement disponible. De son côté, le jeu de l'échappement intervient dans une large mesure en agissant sur l'activité de la combustion pour donner à la chaudière l'élasticité nécessaire et parer aux variations de la dépense.

Ainsi, la masse d'eau contenue dans la chaudière a pour effet :

1° De faciliter la conduite de la machine en réduisant les variations de pression dues à une chauffe ou à une alimentation irrégulières ;

2° De permettre la production d'un travail momentané supérieur au travail moyen.

Grâce à l'énergie emmagasinée dans cette masse d'eau portée à l'ébullition, la locomotive est capable de donner des *coups de collier*, une partie de la puissance développée étant prise sur la réserve de la chaudière. On ne doit cependant pas s'exagérer, à ce dernier point de vue, l'importance du rôle que joue le volume d'eau. Il faut en effet un abaissement très sensible, inadmissible sur les locomotives bien conduites, de la pression et du niveau pour fournir ainsi une quantité notable de travail.

On ne saurait, au delà d'une certaine mesure, accroître le volume d'eau de la chaudière sans porter atteinte aux qualités primordiales de la locomotive qui sont la légèreté et la mobilité que l'on ne doit pas sacrifier pour rendre plus facile la tâche du mécanicien et du chauffeur.

Beaucoup de machines françaises, appartenant d'ailleurs à des types de création ancienne, ont reçu des tubes extrêmement longs surtout en vue d'accroître le volume d'eau de la chaudière. On semble préférer aujourd'hui, soit réduire la capacité de la chaudière, soit opérer l'accroissement par une augmentation du diamètre du corps cylindrique, ce qui est sans doute la meilleure solution depuis qu'on ne craint plus de relever les chaudières, car on réduit ainsi la longueur de la machine.

D'ailleurs, l'augmentation du volume d'eau ne constitue pas le seul moyen d'accroître l'énergie en réserve dans les chaudières qui est aussi fonction de la pression et de la température de régime. L'élévation du timbre concourt donc au même résultat sans entraîner au même degré les inconvénients inhérents à l'accroissement du poids. Les chaudières des machines de construction récente, timbrées à des pressions de 11 à 15 kg., présentent donc, à volume d'eau égal, une plus grande réserve d'énergie que les anciennes fonctionnant à des pressions de 8 à 10 kg. Elles peuvent ne pas être susceptibles de fournir un travail moyen plus considérable, mais elles sont capables de produire un travail momentané plus grand. On peut donner à la locomotive une assez grande élasticité en produisant la vapeur, dans la chaudière, à une pression notablement supérieure à celle que l'on veut maintenir dans les boîtes à tiroirs et en interposant un détendeur entre le régulateur et les cylindres. C'est ce que fait aujourd'hui la Compagnie d'*Orléans* pour certaines machines dont le timbre est de 15 kg., la pression étant réduite à 10 kg. par un détendeur (voir § 105). On obtient ainsi une marge de 5 kg. qui permet de donner quelques coups de collier et de parer à des variations de pression étendues.

Quant au volume du dôme, il joue un rôle peu important comme nous l'avons expliqué dans un autre chapitre en traitant des ébullitions et entraînements d'eau. Quoi qu'on fasse, ce volume est toujours relativement faible et comme la vapeur qui s'y trouve contenue n'est pas à une pression sensiblement plus élevée que dans la boîte à tiroir — à moins que l'on emploie un détendeur —, il n'a qu'une action régulatrice des plus faibles. Aussi a-t-on tendance, en France, à réduire le volume des dômes que l'on faisait très considérable à une certaine époque, aux dépens de la légèreté. Au point de vue des ébullitions et entraînements d'eau, on doit surtout s'attacher à accroître la surface du niveau, autrement dit le *plan d'ébullition*, c'est-à-dire à marcher avec un niveau bas — ce qui, accessoirement d'ailleurs, augmente le volume de vapeur — et à placer l'orifice de la prise de vapeur ou du régulateur aussi haut que possible. Le dôme, dans les machines anglaises et américaines n'est, à vrai dire, qu'un renflement de la chaudière permettant de relever le col de cygne et lui servant d'enveloppe. Il en est de même dans beaucoup de machines construites en France récemment, quoique à un degré un peu moins grand, par exemple dans les nouvelles locomotives de la Compagnie de l'*Ouest*, ou dans les compound à quatre cylindres des Compagnies du *Nord* et du *Midi*.

Nous donnons ci-dessous un tableau relatant les quantités d'eau et de vapeur contenues dans les chaudières de quelques types connus et appréciés de locomotives.

Volume d'eau et de vapeur contenus dans quelques chaudières locomotives.
(La hauteur de l'eau au-dessus du ciel est supposée de 0,100 m.)

DÉSIGNATION DES MACHINES	EAU	VAPEUR
	Litres.	Litres.
Ouest. Machines 2 301-2 304	5 680	3 000
— 963-990	3 500	1 900
— 2 245-2 259	3 900	1 800
Nord. Machines 2 201-2 212	3 050	2 550
— 2 121-2 137	3 610	2 100
— 3 473-3 512	3 040	2 490
— 4 046-4 075	5 430	2 700
Est. Machines 693-704	4 107	1 453
— 813-840, chaudière Flaman	5 329	2 111 (0,44 au-dessus du ciel).
— 0,526-0,541	5 510	1 312
Paris-Lyon-Méditerranée. Machines 111-400	4 200	2 600
— — B 111-400	3 050	2 340
— — C 21-60	2 820	2 300
- — 3 211-3 362	3 530	2 480
Paris-Orléans. Machines 51-76	3 750	1 995
— 77-86	3 897	2 658
— 101-102	4 969	2 911
— 942-996	4 365	2 171

PROPORTIONS DE QUELQUES

DÉSIGNATION DES MACHINES	HAUTEUR maximum du ciel par rapport au-dessous du cadre.	LONGUEUR intérieure du foyer en bas	LARGEUR intérieure du foyer en bas.
FRANCE	m.	m.	m.
Ouest. Express à bogie, 963-990	1,685	1,892	1,052
— 6 roues accouplées à bogie, 2301-2304[2]	1,800	2,570	1,000
— Banlieue, 6 roues accouplées, 3531-35	1,650 (a)	1,261	1,024
Nord. Express à bogie, type Outrance, 2861	1,580	2,200	1,042
— Express à bogie compound, 4 cylindres, 2123-2137[2]	1,725	2,013	0,992
— Marchandises, 8 roues accouplées	1,585	2,172	0,962
— Banlieue, 4 roues accouplées et à bogie, 2311-2360	1,300	1,632	0,964
Est. Express à 3 essieux, 543-562	1,663	2,360	1,015
— Express à bogie, 813-840[1]	2,049	2,380	1,016
— Banlieue, 6 roues accouplées, 705-742	1,628	2,285	0,991
— Marchandises, 6 roues accouplées, 1000-1005	1,730	2,515	1,030
Paris-Lyon-Méditerranée. Express, type 1879, 111-400	1,820	2,217	1,010
— Express à bogie, compound à 4 cylindres, C. 21-60[2]	1,813	2,223	1,024
— 8 roues accouplées, compound à 4 cylindres, 3211-3262[2]	1,765	2,327	1,019
Paris-Orléans. Express, type 1894, 77-86[3]	1,660	1,690	1,030
— Express, type 1889, 101-102[3]	1,910	2,350	0,941
— Banlieue, 6 roues accouplées, 2168-2200	1,936	1,910	1,000
Etat. Express, type 1891	»	»	»
— Marchandises, 8 roues accouplées	1,795	1,536	1,350
— Marchandises, 6 roues accouplées	1,430	1,226	0,986
Midi. Express à 3 essieux, 1601	1,520	1,702	1,006
— Express à bogie, compound, à 4 cylindres[2]	»	»	»
— Marchandises, 8 roues accouplées	1,690	1,900	1,120
ÉTRANGER			
GRANDE-BRETAGNE — *London and S. W. Ry.* Express à bogie	1,765	1,724	0,97[illegible]
London Brighton. Express à 3 essieux. Type Gladstone	1,940	1,822	1,03[illegible]
Great Eastern. Express à 3 essieux	1,714	1,622	1,029
Great Western. Express à 4 roues accouplées et à bogie	1,822	1,727	1,016
Midland. Express à roues libres	1,803	1,776	1,029
North Eastern. Express à 4 roues accouplées et à bogie	1,942	1,920	0,984
L. N. W. Express compound Webb, type Jeannie-Deans	»	1,86	1,016
Lancashire and Yorkshire. Toutes machines	1,778	1,641	1,067
Caledonian. Express, 4 roues accouplées et bogie, type Dunalastair	1,990	1,792	1,070
ÉTATS-UNIS — *New-York Central.* Express à bogie, 999	1,784	2,753	1,038
Chicago North Western. 4 roues accouplées à bogie	1,960	2,443	1,025
Erie. 6 roues accouplées à bogie. Classe O	1,750	3,400	1,038
Chicago Burlington. 4 roues accouplées à bissel	1,581	2,731	1,343
Pensylvania. Express à bogie. Classe P. Type de 1895	1,537	3,048	1,054
Id. Marchandises Mogul, type de 1895	1,684	2,730	1,016
Maine Central. Marchandises Mogul	1,930	2,443	1,025
SUISSE — *Central Suisse.* Marchandises Mogul	1,690	1,706	1,014
Union Suisse 6 roues accouplées compound	»	1,684	1,000
Gothard. 6 roues accouplées	1,500	1,785	1,010
ALLEMAGNE — *Etat prussien.* Hanovre. Express 4 roues accouplées	1,570	2,250	1,010
Etat badois. 6 roues accouplées et bogie	»	»	»
AUTRICHE — *Kaiser Ferdinand Nord-Bahn.* 4 roues accouplées et bogie	»	2,607	1,110
Société austro-hongroise. 4 roues accouplées à 3 essieux	1,610	2,218	1,038
Etat. 4 roues accouplées, bogie	»	»	»
ITALIE — *Méridionaux.* 4 roues accouplées et à bogie	1,464	2,066	0,986
Méditerranée. 4 roues accouplées et à bogie	1,700	2,336	0,996
RUSSIE — *S.-O. russe.* Express à bogie	1,615	1,798	1,048
Vladicaucase. 6 roues accouplées à bogie	1,600	1,819	1,020
DIVERS — *Etat roumain.* Express à bogie	1,600	2,170	1,010
Etat néerlandais. Express à 3 essieux	1,600	2,057	1,060
Etat indien. Express à bogie	1,835	1,719	1,280

[1] Chaudière Flaman.
[2] Tubes à ailettes.
[3] Foyer Ten-Brinck.
[4] Lame d'eau dans le foyer.

CHAUDIÈRES LOCOMOTIVES

SURFACE de grille (s).	DIAMÈTRE moyen du corps cylindrique.	NOMBRE des tubes.	DIAMÈTRE extérieur des tubes.	LONGUEUR des tubes entre plaques.	SURFACE de chauffe directe.	SURFACE de chauffe tubulaire.	SURFACE de chauffe totale (S).	RAPPORT $\frac{S}{s}$	SECTION totale des tubes (b). (t).	RAPPORT $\frac{t}{s}$
m.²	m.		m.	m.	m.²	m.²	m.²		m.²	
1,98	1,253	197	45	3,80	10,60	106,00	116,60	58,8	0,2476	0,1255
2,57	1,534 (extérieur.)	112	70	4,00	12,87	151,00	163,87	63,76	0,3688	0,1435
1,28	1,220	203	45	3,200	7,55	91,83	99,38	77,64	0,2551	0,1992
2,31	1,251	201	45	3,500	9,37	90,61	99,98	43,3	0,2526	0,1093
2,04	1,260	94	70	3,900	10,84	144,43	155,27	76,1	0,3095	0,1517
2,08	1,500	197	50	4,100	9,17	115,45	124,72	59,96	0,3133	0,1506
1,57	1,300	198	45	3,300	7,80	77,20	85,00	54,1	0,2488	0,1584
2,40	1,268	178	48,8	4,100	9,13	106,33	115,46	48,11	0,2707	0,1127
2,42	1,168	304	40	4,300	13,61	154,68	168,29	69,60	0,2925	0,1208
2,26	1,300	245	40	4,100	10,60	118,72	129,32	57,2	0,2357	0,1043
2,59	1,430	190	49	3,900	11,70	107,96	119,66	46,20	0,2889	0,1115
2,24	1,261	185	50	4,945	10,50	132,21	142,71	63,70	0,3075	0,137
2,27	1,320	133	65	3,000	10,28	137,38	147,60	65,02	0,3536	0,1557
2,37	1,400	139	65	3,000	9,98	143,28	153,26	64,60	0,3696	0,1559
1,74	1,250	171	48	4,957	11,05	127,82	138,87	79,77	0,2483	0,1427
2,22	1,250	160	48	5,140	13,94	124,02	137,96	62,14	0,2323	0,1466
1,91	1,300	209	43	3,750	11,99	105,87	117,86	61,70	0,2370	0,124
1,92	1,230	158	50	4,961	9,45	110,83	120,28	62,5	0,2513	0,1308
2,08	1,500	245	50	5,36	9,71	189,77	199,48	95,9	0,3896	0,1873
1,21	1,250	154	50	4,295	6,95	93,52	147,00	121,48	0,2449	0,2024
1,71	1,280	194	48	3,493	9,70	102,14	111,84	65,4	0,2817	0,1647
2,42	1,380	111	70	3,900	11,40	90,97	192,37	42,3	0,3655	0,1514
1,90	1,523	270	52,5	4,900	10,85	186,8[illegible]	1[illegible]7,6[illegible]	104,00	0,4585	0,2413
1,67	1,321	240	44	3,454	11,35	115,72	127,07	76,09	0,2867	0,1716
1,92	1,321	333	38	3,200	10,58	128,03	138,61	72,19	0,3023	0,1522
1,67	1,321	254	41	3,150	9,37	103,69	113,06	67,7	0,2585	0,1548
1,93	1,273	245	44	3,283	11,28	112,10	123,38	63,92	0,2852	0,1477
1,82	1,245	244	41	3,265	10,87	104,37	115,24	63,31	0,2484	0,1364
1,95	1,321	201	44	3,610	12,77	108,00	120,77	61,93	0,2401	0,1231
1,90	1,205	225	48	3,426	14,70	124,07	138,77	68,3	0,3267	0,1719
1,74	1,270	220	45	3,553	10,00	103,00	113,00	64,94	0,2764	0,1588
1,92	1,450	265	41	3,225	11,10	128,90	130,00	67,7	0,2696	0,1404
2,85	1,473	268	51	3,632	21,64[a]	157,69	179,33	62,92	0,4262	0,1496
2,50	1,578	287	51	3,400	26,80[a]	159,32	186,12	74,44	0,4565	0,1825
3,53	1,524	275	51	4,320	15,75	176,10	191,85	54,34	0,4373	0,1239
3,15	1,457	210	51	3,886	14,60	129,31	143,91	45,68	0,334	0,106
3,21	1,575	310	48	3,048	16,40	164,10	180,50	56,23	0,4502	0,1402
2,81	1,727	279	51	3,574	»	»	»	»	»	»
2,50	1,578	320	51	3,657	16,20	185,80	202,00	80,8	0,5089	0,2036
1,75	1,434	200	51	4,200	8,30	122,40	130,70	74,68	0,3324	0,189
1,70	1,352	184	51	4,440	8,60	130,00	138,60	81,52	0,3058	0,1799
1,80	1,450	205	50	3,900	8,73	125,50	134,23	74,57	0,3260	0,1811
2,27	1,400	231	46	3,900	9,00	130,00	139,00	61,23	0,3050	0,1344
2,10	1,430	191	50	4,250	11,15	117,27	128,42	61,15	0,3038	0,1446
2,90	1,470	230	52,7	4,110	12,10	140,20	152,30	52,51	0,411	0,1417
2,30	1,280	149	52	5,000	10,10	121,70	131,80	57,3	0,2585	0,1124
2,90	1,420	205	51	4,440	11,00	144,00	155,00	53,44	0,3407	0,1174
2,02	1,330	181	51	3,600	8,20	92,10	100,30	49,65	0,3008	0,1489
2,35	1,310	170	50	3,800	10,00	91,30	101,30	43,1	0,2585	0,1099
1,87	1,222	208	45	3,800	10,06	111,76	121,82	65,14	0,2748	0,1468
1,45	1,438	210	50	4,300	9,70	144,70	154,40	106,48	0,334	0,2303
2,10	1,290	180	50	4,000	9,60	101,80	111,40	53,05	0,2863	0,1363
2,18	1,273	220	44	3,360	9,78	91,42	101,20	46,42	0,2628	0,1205
2,20	1,416	237	44	3,191	10,70	105,60	116,30	52,86	0,2688	0,1221

[a] Tubes à eau dans le foyer.
a. Hauteur au-dessus de la grille.
b. Viroles non déduites.

NOTA. — Dans les machines anglaises et américaines l'ouverture de la porte et les trous des tubes ne sont pas déduits de la surface directe.

CHAUDIÈRES A TRÈS GRANDS FOYERS DÉBORDANT LES ROUES, DESTINÉS A BRULER DES MENUS OU DES CHARBONS TRÈS MAIGRES

DÉSIGNATION DES MACHINES	BELGIQUE			ÉTATS-UNIS				
	ÉTAT BELGE Express à 4 roues accouplées (type 12)[1].	ÉTAT BELGE Mixte à 6 roues accouplées. (type 6)[1].	ÉTAT BELGE Marchandises à 6 roues accouplées (type 25)[1].	ERIE 6 roues accouplées et bogie (classe R)[2].	ERIE 10 roues accouplées et bissel[2].	DELAWARE L. AND W. Express à bogie[2].	PHILADELPHIA AND READING Express à bissel[2]	LEHIGH VALLEY 4 roues accouplées à bogie[2].
Hauteur maximum du ciel par rapport au-dessous du cadre	1,400	0,925	1,253	1,289	1,371	1,184	1,184	1,289
Longueur intérieure du foyer, en bas	2,753	2,873	2,710	3,050	3,342	3,050	2,895	3,022
Largeur intérieure du foyer, en bas	2,200 1,046	2,574	1,900	1,69	2,492	2,438	2,441	2,083
Surface de grille (s)	4,71	5,74[3]	5,14	5,15	8,31	7,43	7,06	6,35
Diamètre moyen du corps cylindrique	1,326	1,400	1,400	1,700	1,892	1,480	1,429	1,524
Nombre de tubes	242	236	251	258	354	220	324	248
Diamètre extérieur des tubes	45	50	45	51	51	51	38	51
Longueur des tubes entre plaques	3,800	4,050	3,510	3,300	3,639	3,809	3,048	4,127
Surface de chauffe directe	12,510	15,00	11,33	20,40	21,77	16,26	16,08	14,59
— tubulaire	112,17	131,22	109,35	138,90	205,28	143,44	117,38	163,31
— totale (S)	124,67	146,22	120, 68	159,30	227,05	159,70	133,46	177,90
Rapport $\frac{S}{s}$	26,69	25,47	23,47	30,93	27,31	21,49	18,9	28
Section totale des tubes (t)	0,3041	0,3853	0,3154	0,4288	0,5883	0,3656	0,2942	0,4122
Rapport $\frac{t}{s}$	0,0645	0,0671	0,0613	0,0832	0,0706	0,0492	0,0416	0,0649

[1] Foyer Belpaire.
[2] Foyer Wootten.
[3] Dans le type 6 renforcé, la surface de grille est de 6,86 m².

CHAPITRE II

MATÉRIAUX EMPLOYÉS DANS LA CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES

Matériaux employés dans la construction des chaudières. — Enveloppes. Conditions ordinairement imposées; renseignements sur la fabrication et la réception des tôles d'acier pour chaudières. — Précautions à prendre pour le travail des tôles d'acier. — Foyers. Conditions de réception des plaques en cuivre. Emploi de l'acier. — Entretoises. Conditions de réception. — Tubes. Conditions de réception.

180. Matériaux employés dans la construction des chaudières. — On emploie, dans la construction des chaudières de locomotives, les matériaux suivants :

Corps cylindrique et enveloppe de boîte à feu :			Fer ou acier doux ;
Boîte à fumée :	—	—	Fer ou acier doux ;
Foyer :	—	—	Cuivre ou acier ;
Entretoises :	—	—	Cuivre ou acier ;
Tirants de ciel de foyer :		—	Fer ou acier ;
Rivets :	—	—	Fer ou acier ;
Tubes à fumée :	—	—	Laiton, cuivre, fer ou acier ;
Cadres de foyer :	—	—	Fer forgé ou acier moulé.

Nous exposerons avec quelque détail les considérations auxquelles donne lieu l'emploi de ces matériaux et les conditions prescrites par les principales administrations de chemins de fer pour leur réception.

Les enveloppes de chaudières sont encore en fer dans la grande majorité des locomotives circulant en Europe, bien que l'emploi de l'acier ait fait, dans ces derniers temps, d'énormes progrès ; elles sont en acier dans toutes les machines américaines.

181. Tôles de fer pour chaudières. — Quand les chaudières sont en fer, on spécifie généralement que les tôles du corps cylindrique et de l'enveloppe de boîte à feu seront en fer fort supérieur (n° 5) et les tôles, destinées à recevoir un travail d'emboutissage, en fer fin (n° 6). On demande généralement au premier une résistance minimum à la rupture de 33 kg. par millimètre carré avec un allongement de 12 p. 100 et au second une résistance de 35 kg. et un allongement de 16 p. 100 ; on admet ordinairement une tolérance de 2 kg.

ou de 2 0/0 d'allongement, à condition que chaque kilogramme en moins soit compensé par 1 0/0 en plus sur l'allongement et réciproquement.

Nous donnons à titre d'exemple quelques extraits du cahier des charges de la *Compagnie de Paris à Orléans* et du *Midland Railway* pour la fourniture *des tôles de fer.*

Chemin de fer de Paris a Orléans. — Il ne sera admis aucune tolérance en moins sur la longueur et la largeur.

Il pourra être accordé, sur les épaisseurs demandées, mesurées sur les bords, les tolérances suivantes.

Tolérances en plus : 1/10 à 1/20 proportionnellement aux épaisseurs pour tôles de 1 à 10 mm. ;

1/10 pour tôles de 1 mm., soit 0,1 ;

1/20 pour tôles de 10 mm., soit 0,5 ;

1/20 pour tôles au-dessus de 10 mm., sans que cette tolérance puisse dépasser 1 mm.

Tolérances en moins : 1/10 à 1/24 proportionnellement aux épaisseurs pour tôles de 1 à 12 mm. ;

1/10 pour tôles de 1 mm., soit 0,1 ;

1/24 pour tôles de 12 mm., soit 0,5 ;

Pour les tôles au-dessus de 12 mm., la tolérance en moins ne doit pas descendre au-dessous de 0,5.

Toutes les tôles seront très bien soudées, exemptes de pailles, dédoublures, gonfles ou criques.

Ces tôles seront fabriquées avec tous les soins apportés dans les meilleures usines aux fabrications de ce genre.

Elles seront parfaitement laminées et présenteront une surface plane, bien lisse, sans stries, gerçures, gravelures, manque de matière, ou tout autre défaut pouvant nuire à leur aspect ou à leur emploi.

La qualité des tôles sera constatée au moyen d'épreuves à froid par traction, de pliages à froid et d'emboutissages à chaud.

Dans les épreuves par traction, le métal devra donner, pour chaque catégorie et sui-

MARQUE de catégorie.	DÉSIGNATION de la qualité.	RÉSULTATS MINIMA qui doivent être obtenus dans les épreuves par traction.			SENS DU LAMINAGE dans lequel l'éprouvette est découpée.
		Résistance par millim. carré de la section initiale	Allongement pour cent.	Striction $\frac{S-S'}{S} \times 100$.	
		kg.			
P.-O. 1	Tôles puddlées.	28 à 32	6 à 10	15	Long.
P.-O. 2	Tôles en fer corroyé.	33 30	12 10	23 20	Long. Travers.
P.-O. 3	Tôles fines.	35 32	15 12	30 22	Long. Travers.
P.-O. 4	Tôles fines supérieures. Qualité au bois.	35 35	16 16	35 30	Long. Travers.

vant le sens dans lequel l'éprouvette est découpée, la résistance par millimètre carré de section indiquée dans le tableau ci-dessus, ainsi que l'allongement pour cent, et la diminution de section à l'endroit de la rupture en striction pour cent indiqués dans ce même tableau, dont les nombres doivent être considérés comme des minima.

Ces épreuves par traction seront faites au moyen d'éprouvettes de 200 mm. de longueur utile, découpées à froid dans les tôles, ayant la même épaisseur que ces tôles et 25 mm. de largeur, avec faces brutes et champs polis.

Il sera fait ordinairement une épreuve de traction en long pour les tôles P.-O. 1 et deux épreuves, l'une en long et l'autre en travers, pour les tôles des autres catégories par chaque dizaine ou fraction de dizaine de tôles de même épaisseur présentées à la réception, provenant d'une même fabrication, continuée en allure régulière, telle que la constance et l'identité de la qualité puissent être considérées comme parfaitement assurées.

Toutefois, pour les tôles entrant dans la construction des chaudières pour la boîte à feu, le corps cylindrique, les dômes et les armatures, l'essai sera fait pour chaque tôle ou pour chaque groupe de tôles obtenues par le découpage d'une même tôle.

Ces épreuves d'emboutissage seront exécutées à chaud à une température voisine du rouge cerise, en plusieurs chaudes si cela est nécessaire, et ne seront faites que pour les tôles P.-O. 3 et P.-O. 4.

Elles consisteront, pour les tôles P.-O. 3 dans l'exécution d'une calotte sphérique avec bord plat conservé dans le plan primitif de la tôle, $D = 30\ e$.

Pour les tôles P.-O. 4, les épreuves d'emboutissage consisteront dans l'exécution d'un angle trièdre droit formé par le relèvement de deux bords, $h = 7\ e$. Les bords seront raccordés avec la tôle et entre eux par un congé qui, mesuré dans l'intérieur de l'angle, aura pour rayon l'épaisseur e de la tôle.

Dans les épreuves d'emboutissage exécutées avec tout le soin nécessaire, les tôles ne devront présenter ni fentes ni gerçures et il ne devra s'y manifester aucune trace de dédoublure.

Il pourra être fait une épreuve d'emboutissage par chaque dizaine ou fraction de dizaine de tôles de même épaisseur et même catégorie présentées à la réception.

Pour les tôles de 3 mm. d'épaisseur et au-dessous, de toutes catégories, les épreuves par traction seront remplacées par des épreuves de pliage à froid.

Pour les tôles des catégories P.-O. 3 et P.-O. 4 de plus de 3 mm. d'épaisseur, en outre des essais de traction, il pourra également être fait des essais de pliage à froid.

Les conditions de ces essais de pliage sont indiquées dans le tableau ci-après ; les tôles devront pouvoir supporter ces essais sans qu'il se manifeste aucune crique ni gerçure.

MARQUE de catégorie.	DÉSIGNATION de la qualité.	TÔLES de 3 millimètres et au-dessous.	TÔLES d'épaisseur supérieure à 3 millimètres.	SENS du laminage.
P.-O. 1	Tôles puddlées.	A 90° : R = 2,6°	»	Long.
P.-O. 2	Tôles en fer corroyé.	A 45° { R = 2,5° / R = 5°	»	Long. Travers.
P.-O. 3	Tôles fines.	Branches parallèles R = 2,5° / R = 5°	A 90° { R = 2° / R = 4°	Long. Travers.
P.-O. 4	Tôles fines supérieures. Qualité au bois.	Branches parallèles R = 0,5° / R = 3	A bloc { R = 2° / R = 4°	Long. Travers.

Les épreuves de pliage seront faites sur des bandes de 50 mm. de largeur ayant la même épaisseur que la tôle à essayer et découpées à froid. Les arêtes ne seront pas arrondies ; on tolérera seulement l'enlevage des bavures au moyen d'une lime douce.

Midland Railway. — *Tôles de fer supérieur du Yorkshire.* — Un barreau de 25 mm. de diamètre devra pouvoir être plié de manière que les deux branches soient perpendiculaires l'une sur l'autre, sans qu'il se manifeste aucune trace de déchirure. La résistance à la traction devra être d'au moins 36 kg. par millimètre carré avec 24 0/0 d'allongement pour les éprouvettes en long et de 33 kg. par millimètre carré avec 12 0/0 d'allongement pour les éprouvettes en travers.

182. Emploi de l'acier pour la confection des chaudières. — Quelle que soit la sévérité des essais et la conscience avec laquelle ils sont effectués, les tôles de fer laissent toujours une incertitude en ce qui concerne l'emboutissage ; au cours de ce travail, les meilleures d'entre elles se dédoublent, trahissant ainsi des pailles provenant d'une soudure imparfaite et il en résulte souvent un déchet considérable. Les tôles d'acier n'ont pas cet inconvénient et se prêtent fort bien au contraire au travail d'emboutissage ; quand elles sont très douces et moyennant des précautions que nous indiquerons, dont même les Américains se dispensent presque toujours, elles donnent satisfaction en service. Leur emploi est cependant encore discuté par beaucoup d'ingénieurs éminents.

Les préventions, si longtemps justifiées, des Compagnies européennes contre l'acier ont eu en partie pour origine une série d'insuccès dus sans doute à l'emploi un peu prématuré de ce métal, à une époque où on ne savait pas le produire avec toute la douceur nécessaire à ce genre d'application.

Depuis que la fabrication des aciers doux a pris le développement et atteint la perfection que l'on sait, les administrations de chemins de fer arrivent peu à peu, avec la prudence qui s'impose en pareille matière, à l'emploi de ce métal et, suivant les résultats de leur pratique, en généralisent plus ou moins rapidement l'emploi. Il semble aujourd'hui prouvé que l'acier, suffisamment doux, se prête bien à la construction des chaudières locomotives et donne les mêmes garanties de sécurité que le fer. Il coûte aujourd'hui moins cher que ce dernier métal, se prête mieux que lui au travail d'emboutissage et permet, grâce à sa plus grande résistance vive, de réduire un peu les épaisseurs, c'est-à-dire d'alléger les chaudières. Il est vrai qu'il demande, dans sa mise en œuvre, des soins particuliers qui peuvent compenser, et parfois au delà, le moindre prix des tôles.

Quoi qu'il en soit, on peut dire que l'acier, systématiquement écarté autrefois, a, depuis peu à peu, fait son chemin, et qu'il est entré actuellement dans une période d'application courante, son emploi général n'étant plus, croyons-nous, qu'une affaire de temps. Ainsi, la plupart des Compagnies

françaises ont commencé, d'une façon plus ou moins générale, l'application de l'acier aux chaudières locomotives ; celles du *Midi*, de l'*Est*, de *Paris à Orléans* et de *Lyon* ne construisent même plus actuellement, croyons-nous, que des chaudières en acier.

Il semble que certaines administrations doivent considérer pendant longtemps encore l'acier comme un métal réservé à la construction des chaudières les plus puissantes en raison de la grande épaisseur qu'on devrait donner à leur enveloppe et qui serait difficilement réalisable avec le fer, par exemple aux chaudières ayant des corps cylindriques d'un diamètre supérieur à 1,40 m. et timbrées à des pressions de 12 kg. au moins, réservant au contraire la tôle de fer pour les chaudières de dimensions courantes dont les épaisseurs ne doivent pas dépasser 18 mm. Cette pratique est fort rationnelle, mais on ne doit pas oublier que certaines précautions, inutiles avec le fer, sont nécessaires dans le travail de l'acier, et qu'on obtiendra d'autant plus difficilement des ouvriers qu'elles soient strictement appliquées, que l'on travaillera, simultanément ou alternativement, des tôles de fer et d'acier dans le même atelier.

En Angleterre, l'acier, d'abord employé par trois Compagnies seulement, celles du *London and North Western*, du *North Eastern*, et du *Glasgow and South Western*, se répand presque aussi vite que chez nous bien que la prévention contre ce métal ait été plus vive que partout ailleurs. Actuellement, il serait plus long d'énumérer les Compagnies qui font emploi de l'acier que celles où ce métal est encore proscrit. Parmi les diverses administrations étrangères qui emploient l'acier sur une échelle plus ou moins grande, il convient de citer : en Belgique, les chemins de fer de l'*Etat* et le *Grand Central ;* en Suisse le *Jura-Simplon* et le *Saint-Gothard ;* en Italie, les réseaux de la *Méditerranée* et de l'*Adriatique ;* en Autriche, les chemins de fer de l'*État*, du *Nord-Ouest*, du *Nord-Empereur-Ferdinand*, la plupart des réseaux des colonies anglaises ; toutes les Compagnies américaines, etc.

La mise en œuvre des tôles d'acier exige des précautions particulières au sujet desquelles les différentes administrations ont formulé des prescriptions que nous énumérerons ainsi que les conditions de réception imposées.

183. Conditions ordinairement imposées et renseignements sur la fabrication et la réception des tôles d'acier pour chaudières. — Nous résumerons dans ce paragraphe les principales conditions prescrites par quelques administrations de chemin de fer, en France et à l'étranger [1].

CHEMINS DE FER DE L'OUEST. — Les tôles d'acier doux pour chaudières devront être bien laminées et bien soudées, présenter une surface lisse, unie et aussi régulièrement plane

[1] Nous avons puisé un grand nombre de renseignements dans le rapport très complet présenté, par M. Belleroche, à la cinquième session du *Congrès International des Chemins de fer.*

que possible; elles seront saines, exemptes de pailles, criques, dartres, fissures, repliures, soufflures, manques de matières ou autres défauts pouvant nuire à leur solidité ou à leur aspect

Pour les *essais de traction* on prélèvera des éprouvettes de 200 mm. de longueur utile ayant :

Pour les tôles de 25 mm. d'épaisseur et au-dessus, une section carrée de côté égal à l'épaisseur de la tôle et, pour les tôles de moins de 25 mm. d'épaisseur, une section d'épaisseur égale à l'épaisseur de la tôle et de 25 mm. de largeur.

Ces éprouvettes seront découpées et façonnées entièrement à froid, dans des bandes de largeur supérieure à celle des éprouvettes d'une quantité au moins égale à deux fois leur épaisseur. Dans aucun cas, les bandes prélevées dans la tôle pour le façonnage des éprouvettes ou les éprouvettes elles-mêmes ne devront être réchauffées, trempées, recuites ou martelées, ni être l'objet d'aucune préparation susceptible de modifier la nature du métal. Toutefois, le redressement des bandes destinées à la réparation des éprouvettes, lorsqu'il sera nécessaire, pourra être fait à chaud, à l'aide du marteau ou du maillet, à une température ne dépassant pas le rouge sombre.

Les repères extrêmes devront être placés à une distance des naissances des attaches ou des congés des têtes, au moins égale au plus grand côté de la section transversale de l'éprouvette.

Il sera prélevé, dans les conditions qui viennent d'être indiquées, deux éprouvettes (l'une dans le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire) dans chacune des tôles présentées à la réception. Les charges de rupture par millimètre carré de section et les allongements mesurés sur les 100 mm. comprenant le point de rupture devront atteindre au moins 45 kg. et 25 0/0 sans tolérance aucune ni sur la charge de rupture ni sur l'allongement; en outre, la charge de rupture ne devra en aucun cas dépasser 50 kg.

Pour l'*essai de pliage*, deux bandes de tôle de 250 mm. de longueur et 40 mm. de largeur seront prélevées à froid, l'une dans le sens du laminage, l'autre dans le sens du laminage, l'autre dans le sens perpendiculaire, dans chacune des tôles soumises aux essais à la traction; les côtés de ces bandes ne devront pas être arrondis; toutefois l'acuité des angles pourra être légèrement enlevée à la lime douce. Les bandes devront, avant l'essai, être chauffées au rouge cerise un peu sombre et trempées dans de l'eau à la température de 28 degrés centigrades.

Les bandes dont il s'agit devront pouvoir être pliées complètement sur elles-mêmes jusqu'au contact des deux branches.

Pour l'essai d'élargissement du mandrin, deux bandes de tôle de 200 mm. de longueur et de 60 mm. de largeur, prélevées à froid, l'une en long, l'autre en travers, dans chacune des tôles soumises aux essais à la traction, seront percées en leur centre de figure d'un trou de 21 mm. de diamètre. Le diamètre de ce trou devra pouvoir être agrandi à froid jusqu'à 35 mm. au moyen d'un mandrin ayant une conicité de 1/16.

Les tôles de chaudières seront soumises, à raison d'une tôle par lot et au moins une tôle par lot de 50 tôles, à l'essai d'emboutissage à chaud ci-après : on confectionnera une calotte hémisphérique avec bord plat ayant 300 mm. de diamètre.

Les tôles devront pouvoir subir les essais d'élargissement au mandrin, pliage, emboutissage, indiqués ci-dessus, sans qu'il s'y manifeste aucune crique, gerçure, dessoudure, ni aucun indice de rupture.

Chemins de fer de l'Est. — L'acier employé à la construction des chaudières est obtenu au four Martin, généralement à sole basique, à l'exclusion du procédé Bessemer acide ou basique.

Les fontes phosphoreuses proprement dites sont exclues : les matières traitées au four Martin basique doivent être analogues à celles qui peuvent être employées au four Martin acide.

Aucune tôle ne doit être obtenue par la réunion de plusieurs lingots ou parties de lingots; toute soudure est absolument interdite

Les usines n'emploient pas toujours de mélanges particuliers pour obtenir l'une ou l'autre des deux qualités de tôles d'acier doux TA et plus doux TB. Dans une même coulée, il n'est pas rare d'obtenir à la fois les deux qualités parmi les différents lingots.

La Compagnie de l'Est, désigne comme suit, dans ses cahiers de charges, les deux qualités de tôles employées pour la construction des chaudières :

Tôles TA employées pour la confection du corps cylindrique et de l'enveloppe de boîte à feu extérieure :

Tôles TB employées pour la confection des pièces embouties, telles que plaques avant et arrière de boîte à feu, plaque tubulaire, embase de dôme, et en général de toutes les pièces qui nécessitent un travail de forge.

Pour l'obtention des aciers TA et TB la Compagnie a constaté l'emploi des minerais suivants :

Usine A.	Minerais de Mokta (Algérie), Bilbao (Espagne), Allevard (Isère, France);
Usine B.	Fontes peu phosphoreuses de Chasse (Rhône) et de Pouzin (Isère), dépassant rarement 0,05 à 0,06 0/0 S et Ph, distinctes des fontes spéciales de déphosphoration et produites avec des minerais de Mokta, de Bilbao et de France mélangés avec des riblons de fer et d'acier;
Usine C.	Minerais de Sommorostro (Espagne) exclusivement.

La coulée se fait en poche à une température aussi élevée que possible.

Les lingots le plus généralement employés ont la forme de troncs de pyramide à base rectangulaire, présentant une conicité suffisante pour le démoulage. Les côtés de la base sont dans le rapport de 1/2 environ, et leur hauteur est égale à 3 ou 4 fois le plus petit côté de la base. On coule quelquefois des lingots à section carrée, dont la longueur est égale à 2,5 fois le côté de la section, mais ces lingots carrés nécessitent un blooming qui les ramène en lingots plats ou brales, dans lesquels on découpe des bidons de poids voulu.

Sur tous les lingots, la proportion sacrifiée varie de 35 à 40 0/0 du poids du lingot, soit une chute de 3 à 4 0/0 dans le bas et de 32 à 36 0/0 dans le haut.

Le corroyage est très variable suivant l'épaisseur des tôles et suivant la forme des lingots. En général, il est moindre pour les lingots rectangulaires que pour les lingots à section carrée. On choisit d'ordinaire le lingot de telle façon que l'épaisseur de la tôle obtenue est environ le vingtième de l'épaisseur du lingot primitif.

Le laminage des lingots se fait généralement en une seule chaude; deux chaudes sont cependant quelquefois nécessaires, par exemple dans le cas de tôles très larges et de faible épaisseur.

Ces chaudes se font à une température de 1 300 à 1 400° environ.

La largeur de l'ébarbage est au minimum de 5 à 6 centimètres de chaque côté de la tôle.

Les indications suivantes sont celles données par les usines comme caractéristiques des livraisons de tôles faites à la Compagnie de l'*Est*.

DÉSIGNATION	ANALYSES (en pour cent).				
	C	Si	S	Ph	Mn
Usine A { TA . . . . TB	0,12 à 0,18	Traces.	Traces.	0,025	0,45
Usine B { TA	0,13 à 0,15	0,10 à 0,15	0,01 à 0,03	0,005 à 0,02	0,35 à 0,50
Usine B { TB	0,11 à 0,13	0	0,01 à 0,03	0,005 à 0,02	0,35 à 0,45
Usine C { TA . . . . TB	0,10 à 0,27	0,02	0,02	0,025	0,40 à 0,50

L'acier doux TA se soude assez difficilement ; l'acier très doux TB se soude mieux, toutefois son degré de soudabilité n'est pas aussi élevé que celui du fer. Il résulte d'essais assez nombreux qu'il y a plutôt collage que soudure intime. Le tableau ci-après donne quelques résultats d'essais tout récents sur des éprouvettes soudées et non soudées de diverses provenances.

On doit laminer l'acier très chaud, mais en prenant bien garde aux coups de feu qui peuvent déterminer des cristallisations. Le laminage doit être fait dès que le lingot est arrivé à sa température maximum, 1 300 à 1 400° C.

Le *recuit au laminoir* est exigé et inscrit au cahier des charges. Généralement le recuit a lieu à la volée et feuille à feuille pour mieux conduire l'opération : température 900° C. environ.

Pour éviter les coups de feu, les tôles sont retirées du four dès que cette température est atteinte ; les feuilles ne se gauchissent pas et l'oxydation des surfaces est peu appréciable.

Les fours qui semblent présenter les meilleures dispositions ont deux ou quatre foyers, suivant leurs longueurs assez variables, situés symétriquement sur les grands côtés.

La surface de grille de ces foyers, non soufflés et dont des registres règlent l'allure, est calculée par rapport aux dimensions du four, de telle sorte que la température *en tirage actif* ne puisse pas être portée au delà de 900 à 1 000° C.

Le four a une ouverture à chaque extrémité. Les feuilles entrent par un bout et sortent par l'autre.

A l'endroit des foyers, la voûte du four est à double paroi pour garantir cette partie contre l'excès de chaleur. Les flammes passent au-dessus de la paroi inférieure et se répandent ensuite dans tout le four.

Les gaz résultant de la combustion s'échappent par des orifices situés près

TABLEAU DONNANT LES RÉSULTATS DE TRACTION FAITS SUR DES ÉPROUVETTES D'ACIER SOUDÉES ET NON SOUDÉES

Chemins de fer de l'Est.

DÉSIGNATION du métal.	DÉSIGNATION des usines.	NUMÉROS des éprouvettes.		SECTION PRIMITIVE S des éprouvettes.		RÉSISTANCE à la rupture par mm² de la section primitive. Éprouvettes.		ALLONGEMENT p. 100 sur une longueur calibrée de 200 mm. Éprouvettes.		OBSERVATIONS
		Soudées.	Non soudées.	Soudées.	Non soudées.	Soudées.	Non soudées.	Soudées.	Non soudées.	
						Kg.	Kg.			
TA	F	1	3	382,5	391	30,94	43,09	4,2	25,8	N° 1 cassé dans la soudure.
		2	4	358	386	30,89	42,48	4,1	26,1	N° 2 —
TA	A	1	3	302,5	325	39,47	43,52	23,8	25,2	N° 2 —
		2	4	311	309	34,40	42,20	14,9	26,1	
TA	D	1	3	352	355	37,64	41,93	23,1	30,1	N° 1 —
		2	4	352	363,5	31,53	42,06	5,1	25,4	N° 2 —
TB	C	1	3	370	375,5	40,81	40,32	26,2	27,2	N° 2 —
		2	4	370,5	375	31,89	40,64	4,8	27,4	
TB	D	1	3	348	358	34,77	37,20	9,8	27,1	N° 1 —
		2	4	343	353	34,72	37,80	9,6	28,1	N° 2 —
Moyennes tôles TA.						34,15	42,55	12,55	26,45	
Moyennes tôles TB.						35,55	38,99	12,6	27,45	

NOTA. — Les éprouvettes nos 1 et 3, 2 et 4, ont été prises côte à côte dans les mêmes tôles.

des portes et gagnent la cheminée sans chauffage par retour. Cette disposition des orifices près des portes et au niveau du sol garantit les tôles contre l'entrée de l'air extérieur.

La sole, au niveau du terre-plein de l'atelier, est composée, dans le sens de la longueur, de files de tasseaux en fonte ou de briques réfractaires d'un profil spécial ; les sommets de ces saillies, sur lesquelles reposent les tôles à recuire, sont réglés d'une façon bien plane.

Au sortir du four, les tôles sont étalées sur un marbre refroidisseur en fonte percé de trous : il est au niveau du sol et recouvre une fosse en maçonnerie. Le refroidissement a lieu de cette façon sur les deux faces à la fois et évite le voilement des feuilles.

On trouvera ci-dessous quelques extraits du cahier des charges de la *Compagnie de l'Est* pour la fourniture des tôles d'acier pour chaudières :

L'acier des tôles de chaudières sera de toute première qualité ; il devra être sain, homogène, ductile.

Cet acier sera obtenu aux fours Siemens-Martin, Pernot ou analogues, à l'exclusion du convertisseur Bessemer. L'emploi même partiel des fontes, fers ou aciers provenant de minerais phosphoreux est absolument interdit.

Aucune tôle ne doit être obtenue par la réunion de plusieurs lingots ou parties de lingots ; toute soudure est absolument interdite.

Les tôles d'acier pour chaudières doivent être parfaitement laminées ; elles présenteront une surface unie, propre et lisse, exempte entièrement de stries, soufflures, gales, du manque de matière, criques, gerçures, gravelures, ondulations et défauts d'aucune sorte.

Toute trace de réparation, travail au marteau ou au burin ayant pour but de masquer ou de faire disparaître les défectuosités superficielles est une cause de rebut.

La texture des tôles d'acier doit être sans défaut, parfaitement homogène, sans traces de cristallisation vers les surfaces et présenter un grain fin et régulier.

Il ne sera accordé aucune tolérance *en moins* sur les dimensions fixées ; la tolérance en plus ne pourra dépasser un centimètre en tous sens pour les tôles d'épaisseurs inférieures à 12 mm. et 2 centimètres pour les tôles d'une épaisseur égale ou supérieure à 12 mm.

L'épaisseur des tôles sera régulière et uniforme ; les tolérances ne devront pas, sauf indications contraires portées sur les marchés ou commandes, dépasser les limites suivantes :

En plus : tôles de 8 à 20 mm. 5 0/0 de l'épaisseur ;
En moins : tôles de 8 à 20 mm. 2 1/2 0/0 de l'épaisseur.

La régularité de l'épaisseur, au milieu, sera contrôlée par le calcul du poids théorique obtenu en multipliant les dimensions matérielles par les poids spécifiques et par la comparaison du résultat de ce calcul avec le poids réel.

Pour l'*épreuve de pliage à chaud double*, le morceau d'essai sera plié suivant son axe longitudinal. Amené au contact, le morceau sera de nouveau plié sur lui-même, au milieu de sa longueur. Cette opération doit être effectuée sans fissures, criques ou défauts d'aucune sorte.

Les bandes prélevées dans les conditions précédentes, sans chauffage ni recuit ultérieur, seront percées à froid, au poinçon, de trois trous de 16 mm. de diamètre, distants entre eux de 0,068 m. pris de centre en centre. Ces trous seront successivement élargis *à froid* par enfoncement de mandrins augmentant de 1 mm. de diamètre par centimètre de hauteur jusqu'à ce que l'élargissement de chaque trou, commencé au diamètre initial, atteigne le diamètre minimum fixé au tableau ci-après. On commencera l'essai par le trou du milieu.

TABLEAU DES ÉPREUVES ET PROPORTIONS DES ESSAIS

Chemins de fer de l'Est.

	DÉSIGNATION DES TOLES		TA TOUTES ÉPAISSEURS	TB TOUTES ÉPAISSEURS
Essais par traction.	1° *Epreuves à froid* sur tôles recuites, dans l'un ou l'autre sens.			
	Proportion des essais		1 par feuille.	1 par feuille.
	Résistance (R) par mm² de la section initiale	pour essai isolé	40 à 45 kg.	36 à 40 kg.
		moyenne	Maxima 42 kg.	Maxima 38 kg.
	Allongement pour cent après rupture (A)		Minimum 26 p. 100.	Minimum 28 p. 100.
	Total (R + A)		Minimum 66.	Minimum 64.
	2° *Epreuves à froid après trempe* (900° C. refroidissement à l'eau à 20° C. maximum), dans l'un ou l'autre sens.			
	Proportion des essais		1 par feuille.	1 par feuille.
	Résistance (R) par mm² de la section initiale	pour essai isolé	A relever.	A relever.
		moyenne	Id.	Id.
	Allongement pour cent après rupture (A)		Ne doit pas être inférieur à 12 p. 100 sur 200 mm.	
	Total (R + A)		A relever.	A relever.
Pliages (redressement au pilon).	3° *Epreuves à froid après trempe*, dans l'un ou l'autre sens (morceau de 240 × 40).			
	Proportion des essais		2 par feuille.	2 par feuille.
	Angle du pli		Au contact.	Au contact.
	Rayons intérieurs de raccordement des 2 branches		0	0
	4° *Epreuves à chaud* (rouge cerise 900° C.), dans l'un ou l'autre sens.			
	Pliage simple (morceau de 240 × 40)	Proportion des essais	1 essai sur 25 feuilles.	1 essai sur 25 feuilles.
		Pliage	A bloc.	A bloc.
		Redressement	180°	180°
	Pliage double (morceau de 400 × 200)	Proportion des essais	1 essai sur 50 feuilles.	1 essai sur 50 feuilles.
		1er pliage longitudinal	A bloc.	A bloc.
		2e pliage transversal	A bloc.	A bloc.
Poinçonnages.	5° *Epreuves à froid* dans l'un ou l'autre sens (2 morceaux de 300 × 70).			
	Proportion des essais		1 essai sur 25 feuilles.	1 essai sur 25 feuilles.
	Avant trempe sur tôles recuites	Diamètre initial	16 mm.	16 mm.
		Agrandissement	42 mm.	45 mm.
	Après trempe	Diamètre initial	16 mm.	16 mm.
		Agrandissement	40 mm.	38 mm.

Il ne devra se produire ni fentes, ni criques, ni gerçures.

Des bandes identiques (sauf qu'elles pourront être dressées à chaud), percées comme il est dit ci-dessus, seront trempées comme il est dit ci-après, puis les trous seront agrandis dans les conditions du tableau ci-après.

Après l'essai, il ne doit se manifester ni fentes, ni criques, ni gerçures, ni autres défauts quelconques.

Les bandes pour essais de pliages seront prélevées comme celles destinées aux essais par traction. Les surfaces de laminage seront conservées et les rives longitudinales de ces bandes ne seront pas arrondies; l'acuité des angles seulement pourra être enlevée à la lime douce, sans jamais dépasser un arrondi de 2 mm. de rayon.

Les essais de *pliage à froid* n'ont lieu que sur des barreaux trempés, prélevés soit dans un sens longitudinal, soit dans le sens transversal. Après essai, les bandes ne doivent présenter ni fentes, ni criques, ni défauts quelconques.

Dans aucun cas, les bandes pour *épreuves de traction* ne doivent être recuites, ni chauffées, après avoir été détachées des feuilles de tôles. Le dressage, s'il est nécessaire, aura lieu à froid et de préférence à la presse.

Aucun coup de lime ne sera donné sur les faces laminées des bandes ou barreaux d'épreuves qui resteront dans l'état où le laminage aura amené la surface de la tôle.

Le façonnage des barreaux d'épreuves dans les bandes est effectué entièrement à froid, sans aucun travail de chauffage, martelage, trempe ou recuit ultérieur.

Les barreaux d'épreuves auront une partie prismatique rigoureusement calibrée d'une longueur exacte et invariable de 200 mm. délimitée par deux coups de pointeau, à partir desquels se trouveront les congés de raccordement avec les parties formant têtes d'attaches des barreaux d'essais.

La section transversale de la partie calibrée sera rectangulaire, les petits côtés étant donnés par les épaisseurs des tôles et les grands côtés (faces de laminage) fixés comme suit :

25 mm. pour les tôles d'épaisseur jusqu'à 20 mm. inclus; section carrée pour les tôles ayant plus de 20 mm. d'épaisseur, le côté du carré étant égal à l'épaisseur de la tôle.

Chemins de fer du Midi. — *Spécification pour les tôles d'acier destinées aux chaudières des machines* 1635 à 1638. — Pour le corps cylindrique, le dôme, pour les parois latérales et le ciel de l'enveleppe extérieure du foyer, c'est-à-dire pour toutes les parties cintrées ou peu embouties, la qualité d'acier à employer sera la suivant :

Acier Martin donnant de 40 à 46 kg. par millimètre carré à la rupture.

Limite d'élasticité au moins égale à 24 kg. par millimètre carré.

Allongement, mesuré sur une longueur de 200 mm². , au moins égal à 25 0/0.

Essai de pliage après trempe au rouge-cerise, exécuté suivant la règle de la marine française, sur chacune des tôles présentées à la réception, c'est-à-dire de la manière suivante :

On découpera dans chaque feuille soumise à la réception une ou plusieurs bandelettes ayant 40 mm. environ de largeur et 26 cm. environ de longueur. Ces bandelettes, qui devront conserver leurs arêtes vives, seront chauffées au rouge-cerise, trempées à l'eau froide et enfin pliées sur un mandrin circulaire sans qu'il apparaisse à leur surface, tant intérieur qu'extérieure, la moindre trace de crique.

Le diamètre du mandrin devra être égal à l'épaisseur de la tôle, $d = e$, pour des bandelettes ayant 26 cm. environ de longueur.

Pour la collerette et la calotte de dôme, les plaques AV et AR de l'enveloppe extérieure du foyer, les embases du régulateur et des soupapes, la qualité d'acier sera la suivante :

Acier Martin donnant une résistance à la rupture comprise entre 34 et 40 kg. par millimètre carré.

Limite d'élasticité au moins égale à 21 kg. par millimètre carré.

Allongement, mesuré sur une longueur de 200 mm., au moins égal à 28 0/0.

Essai de pliage après trempe au rouge-cerise, exécuté suivant la règle de la marine française, sur chacune des tôles présentées en réception.

London and North Western Ry. — L'acier pour tôles à chaudières peut être fabriqué d'après les procédés Bessemer ou Siemens-Martin.

Dans le procédé Bessemer, les lingots sont coulés dans des moules, qui sont remplis par le haut. Dans le procédé Siemens-Martin, ils sont coulés par groupes de six à dix lingots; le métal, ayant traversé un tuyau central et passant par différents canaux à la base de chaque moule, monte graduellement jusqu'à ce que les moules soient remplis. Les lingots ont une section carrée et les dimensions suivantes : 1,114 m. de long, 135,50 cm² à la base et 116,10 cm² au sommet.

Les lingots servant à la fabrication des tôles sont d'abord martelés en barres d'environ 102 mm. d'épaisseur par un pilon à vapeur de 30 t.; elles sont ensuite réchauffées et passées au laminoir à tôles, réduites ou ramenées à l'épaisseur voulue, après quoi elles sont recuites et on les laisse refroidir.

On doit avoir soin que les tôles ne se chauffent pas trop. En faisant recuire les tôles, on les retire du four avant que des paillettes commencent à se former à la surface.

On ne fait pas d'essai avant le recuit.

Après le recuit :

Résistance : 42,5 à 52 kg. par millimètre carré.

A = 20 0/0 minimum ; 30 0/0 maximum ;

S = 38 0/0 minimum ; 55 0/0 maximum.

L'éprouvette doit pouvoir résister, après le recuit, à un pliage dans une presse sous une courbure dont le rayon intérieur est égal à 1 1/2 fois l'épaisseur de la tôle essayée.

Un trou de 16 mm. est foré dans l'éprouvette à 51 mm. du bord et ce trou sera élargi par estampage, à concurrence d'un diamètre de 41,3 mm. au minimum et de 57,2 mm. au maximum.

Une éprouvette destinée à déterminer la résistance à l'extension est coupée de chaque tôle ; le grain ou les fibres doivent se trouver sous un angle droit par rapport à la direction dans laquelle la charge est appliquée; elle a 533 mm. de long et 63,5 mm. de largeur. Elle est réduite à une largeur de 50,8 mm. pour une longueur de 254 mm. Deux autres éprouvettes sont coupées de chaque tôle, l'une pour le perçage et l'autre pour le pliage ; la première a 178 mm. sur 89 mm. et l'autre 279 mm. sur 45 mm. Pour déterminer la résistance à l'extension, on se sert d'une machine à essayer de Bucktan et d'une autre construite par le London and North Western Railway; une petite presse hydraulique sert au pliage et au perçage.

London and South Western Ry. — L'acier doux employé pour le laminage des tôles de chaudières devra être exempt de silicium, de soufre et de phosphore. Les éprouvettes à la traction devront offrir une résistance comprise entre 39,4 et 47 k. avec un allongement minimum de 23 0/0 mesuré sur 254 mm. Chaque tôle sera l'objet d'essais. Conditions de fabrication. Toutes les tôles doivent être obtenues, au moyen des meilleurs procédés en usage, de lingots martelés sur toutes leurs faces, puis réchauffés et laminés à une épaisseur uniforme. Les tôles devront être parfaitement lisses sur leurs deux faces et être exemptes de soufflures, pailles, dartres, repliures et autres défauts. Elles seront retirées du laminoir au rouge vif et seront soumises à un refroidissement lent sur une aire plane. Chaque tôle sera cisaillée aux dimensions données et devra toujours être planée avant d'être expédiée de manière à pouvoir être travaillée à la machine-outil. Toutes les tôles ondulées ou doublées, ou présentant un autre défaut, seront refusées et seront remplacées par les fournisseurs et à leurs frais. Le nom du fournisseur et la date de fabrication doivent être lisiblement poinçonnés sur chaque tôle à une distance des bords de 229 mm. au maximum.

Un échantillon ou tôle d'essai de 0,1858 m²., au minimum doit être expédié par le

fournisseur comme échantillon de la fourniture, avec une analyse complète. Cette tôle d'essais, qui a 13 mm. d'épaisseur, donnera lieu aux essais suivants :

Une bande de 152 mm. de longueur devra pouvoir être pliée à bloc à froid sans qu'il se manifeste aucune rupture ni aucune trace de déchirure sur la partie pliée ; des bandes de 76 mm. seront prélevées et on y pratiquera à la poinçonneuse un trou de 16 mm., qui devra pouvoir être agrandi à froid au moyen de mandrins coniques jusqu'à ce qu'il atteigne 38 mm sans que les bords décèlent aucune trace de rupture.

Des éprouvettes prélevées sur les tôles doivent être essayées à l'usine en présence de l'ingénieur en chef du matériel et de la traction ou de ses agents, si la Compagnie en fait la demande.

Les tôles du corps cylindrique et de l'enveloppe de foyer doivent être entièrement recuites après le poinçonnage des trous de rivets.

La plaque tubulaire de boîte à fumée, les plaques avant et arrière de l'enveloppe de foyer doivent être entièrement recuites après l'emboutissage et le poinçonnage.

New-York central Railroad. — Toutes les tôles seront en acier doux, d'épaisseur parfaitement uniforme, sans défauts de surface. Elles seront parfaitement planées et les tôles gondolées seront refusées. Dans chaque tôle on prélèvera des éprouvettes à la traction, une en long et une en travers ; elles devront donner une résistance au moins égale à 35,15 kg. et inférieure à 45,70 kg. par mm². et un allongement minimum de 25 0 0 mesuré sur une longueur de 0,200 m. On fera également un essai de pliage à froid sur une éprouvette de 0,152 m. de longueur qui devra être pliée à bloc sans criques.

Toutes les tôles qui, en cours de travail, se montreraient défectueuses seront rebutées.

C. B. and Q. Railroad. — Les tôles seront examinées avec soin ; celles qui présenteraient des défauts avant ou après le travail seront refusées.

Dans chaque tôle on découpera, dans le sens de la longueur, une bande de 0,610 m. de longueur et de 0,038 m. de largeur, qui ne devra pas être recuite. On prélèvera dans cette bande une éprouvette à la traction de 0,022 m. de largeur sur 0,115 m. de longueur entre les épaulements. D'autres éprouvettes devront pouvoir être pliées à bloc sans déceler ni fissure ni défaut, soit à chaud ou à froid, soit après avoir été trempées au rouge-cerise. Les tôles dont le poids sera inférieur de plus de 5 0 0 au poids spécifié seront refusées Tout excès de poids supérieur à 5 0 0 ne sera pas payé.

Les éprouvettes à la traction devront donner une résistance de 42 kg. par millimètre carré, et un allongement de 28 0 0 mesuré sur une longueur de 0,102 m. On refusera les tôles qui ne résisteront pas à une charge de 38,5 kg. ou qui en supporteraient de plus de 45,5 kg., ou présenteraient un allongement supérieur à 25 0 0 sur 0,102 m.

Ce que nous disons ailleurs concernant l'absence de soins particuliers aux Etats-Unis pour le travail des tôles d'acier destinées aux foyers s'applique à plus forte raison aux tôles appelées à la construction des enveloppes de chaudières. On recuit peu, on coupe les tôles à la cisaille aux dimensions requises et des trous sont percés à la poinçonneuse. Les Américains reconnaissent qu'il y aurait avantage à opérer comme en Europe, mais ils trouvent cette méthode trop dispendieuse et pensent que la leur est suffisante pour assurer l'étanchéité et la sécurité

184. Précautions à prendre dans le travail des tôles d'acier [1]. — L'acier,

[1] On consultera fructueusement à ce sujet *la Chaudière locomotive*, par M. G. Richard.

en raison de son homogénéité, c'est à-dire de la qualité qui d'autre part fait sa supériorité, est beaucoup plus sensible que le fer aux commencements de ruptures. Les criques, qui se déclarent sur le bord d'une tôle ou d'un trou percé dans une tôle, peuvent se prolonger et s'étendre soit dans le même sens, soit dans la direction perpendiculaire à l'effort. Dans le fer, au contraire, par suite de la non-homogénéité du métal, la ligne de moindre résistance de la tôle est presque toujours déviée, non loin du point où a commencé la déchirure, et prend une inclinaison plus ou moins grande sur la direction de l'effort, et elle s'arrête.

On doit, lorsque l'on travaille à l'atelier des tôles d'acier, prendre certaines précautions en vue d'éviter d'aigrir le métal et d'y déterminer des commencements de rupture qui, invisibles au début, pourraient rapidement prendre des proportions dangereuses. En principe, ces précautions consistent à éviter de brûler les tôles d'acier quand on les chauffe, à les chauffer régulièrement et autant que possible sur toute l'étendue des bords qui doivent être emboutis, faute de quoi le métal perd son homogénéité et se gondole. On ne doit pas marteler ces tôles à froid ou même au-dessous du rouge naissant; autant que possible, on doit opérer ce martelage avec des maillets plats, à large face, répartissant l'effort sur une grande surface. La tôle d'acier, une fois chauffée, doit se refroidir uniformément et lentement, à l'abri de l'air, sous du fraisil. Les trous doivent être percés au foret; si l'on admet qu'elles puissent être poinçonnées, le diamètre du trou devra être inférieur de quelques millimètres au diamètre définitif de telle sorte qu'on puisse l'aléser dans la suite et enlever la zone de métal altérée par le poinçonnage, et dans laquelle peuvent se trouver des commencements de criques.

Ces diverses précautions, particulièrement celles qui ont trait au chauffage et au martelage, ne sont obtenues, ou n'ont été obtenues au début, qu'avec une certaine difficulté, des ouvriers habitués à travailler le fer ne se rendant pas compte des propriétés caractéristiques et de la sensibilité des tôles d'acier. Il faut d'ailleurs reconnaître que, tout en restant nécessaires, elles sont moins indispensables, avec les aciers très doux que l'on emploie aujourd'hui pour la confection des chaudières, qu'avec le métal usité primitivement.

A titre d'exemple, nous énumérerons les conditions que prescrivent deux de nos grandes Compagnies pour le travail et la mise en œuvre des tôles de chaudière en acier :

CHEMINS DE FER DE L'EST. — Pour l'étirage des pinces ou pour un emboutissage partiel, les tôles subissent une chauffe locale sur un feu de forge ordinaire, sans jamais dépasser le rouge cerise clair, et en ayant soin de chauffer à 20 cm. environ et au delà la partie à travailler, de façon que, pendant le travail, il ne se produise pas de tensions dans le métal. On doit cesser de forger dès que la couleur de la pièce atteint le rouge sombre.

Les tôles qui doivent être embouties sur une grande partie de leur pourtour sont chauffées totalement dans un four dormant à la température de 900 à 1000° correspondant au rouge cerise clair.

L'emboutissage à la presse hydraulique, ou plus rarement à la mailloche en bois, est fait immédiatement à la sortie du four et est conduit aussi rapidement que possible. Si l'on est obligé de frapper au marteau, on évite de le faire dès que la température de la pièce atteint le rouge sombre.

Les pièces qui doivent être cintrées sont chauffées dans un four dormant à la température de 200 à 250°. L'intérieur du four est presque noir et la durée de la chaude est d'environ 20 minutes.

Les tôles travaillées à chaud sont refroidies à l'air libre, sur le sol de l'atelier, en évitant cependant les courants d'air.

Après le travail de forge et le montage provisoire de la chaudière, toutes les tôles étant bien assemblées par des boulons, il est procédé au recuit de toute la chaudière dans un four spécial de 38 m³ de capacité.

En principe, on doit chercher, dans le placement des tôles, à laisser celles-ci assemblées entre elles ; dans tous les cas, on place celles qui doivent être démontées de façon que les déformations résultant de la dilatation soient réduites à leur minimum. Ces déformations sont, du reste, extrêmement faibles.

Ainsi, quand la boîte à feu est d'une seule pièce, on la conserve assemblée pour le recuit ; sinon, elle est démontée en trois parties, l'enveloppe extérieure, la plaque avant et la plaque arrière, toutes ces tôles étant placées verticalement.

Les tôles reposent d'aplomb sur des rails placés sur la sole du four.

Les tôles sont placées dans le four complètement froid. Le feu allumé est conduit lentement et de façon à égaliser autant que possible la température dans toutes les parties du four pour arriver, au bout de onze heures de chauffe environ, à une température variant entre le rouge cerise et le rouge clair. Les registres sont alors manœuvrés de façon à conserver cette température pendant une heure environ, puis on jette les feux, et le couvercle du four est un peu soulevé pour empêcher toute élévation de température. On bouche en même temps toutes les issues.

Le temps nécessaire pour arriver à la température du recuit proprement dit est de 12 heures environ.

On laisse refroidir les tôles pendant trois jours ; le troisième jour, on soulève légèrement la calotte du four pour activer le refroidissement et, vingt-quatre après, on défourne les tôles. La durée totale du refroidissement est donc d'environ quatre jours.

Chaque pince est étirée à chaud en une seule chaude, au marteau à main, puis elle est parée à la chasse.

En cas de réparation seulement, certaines pinces sont obtenues au burin.

Le marteau ne s'emploie que pour l'étirage des pinces et pour le travail des tôles à froid. On doit s'attacher à frapper le moins possible sur les tôles, surtout lorsque leur température est au-dessous du rouge sombre.

Pour la confection des pièces de forge qui ne sont pas embouties à la presse hydraulique, on se sert d'abord de la mailloche en bois, quand la tôle est bien chaude, puis, pour le calibrage, on emploie la chasse à parer.

Les plaques avant et arrière de boîte à feu, la plaque tubulaire, l'embase et la calotte du dôme, etc., sont embouties à la presse hydraulique, après avoir subi une ou deux chaudes d'une durée de 20 à 25 minutes, à la température du rouge cerise clair dans un four dormant. Elles sont ensuite chauffées à nouveau dans le même four pour être parfaitement calibrées sur un mandrin.

Les tôles qui n'ont pas, en arrivant des usines, les formes voulues, sont cisaillées à une distance de 1 cm. de leur cote définitive. Le chanfreinage ultérieur fait alors disparaître la partie de la tôle qui se trouve écrouie par le cisaillage.

Pour les bords des tôles forgées d'accès difficile, le poinçon remplace la cisaille, et

dans ce cas la ligne des trous percés se trouve à 1 cm. au moins du contour définitif. De cette façon le chanfreinage ultérieur annihile les mauvais effets du poinçon.

Tous les trous pour clouure de chaudières sont percés au foret, à l'exclusion du poinçon, à un diamètre plus faible de 2 mm. que la cote définitive. Après montage provisoire, aussi parfait que possible (au moyen de boulons), des tôles de la chaudière et après recuit, tous les trous sont alésés mécaniquement ou à la main à leur diamètre définitif.

Toutes les clouures sont rivées à la riveuse hydraulique fixe ou portative, sauf l'assemblage de la plaque avant avec le corps cylindrique, l'embase du dôme, les tubulures qui relient les deux corps cylindriques dans les chaudières Flaman, et qui sont rivées à la main, l'emploi de la riveuse étant impossible.

Toutes les tôles qui doivent être assemblées ont leurs bords chanfreinés.

En principe, on cherche à faire tout le travail de chanfreinage, soit au tour pour les parties circulaires, soit à la machine à chanfreiner pour les parties droites ; ce n'est que dans des parties spéciales de la chaudière qu'on emploie le burin et le marteau.

Autant que possible, on doit éviter l'emploi du burin qui détermine sur les tôles une série de petits sillons qui sont autant de commencements de cassures ; de plus, les coups répétés du marteau frappant sur cet outil provoquent dans la tôle des ébranlements qui peuvent augmenter la fragilité du métal.

Après burinage, on doit avoir soin de passer la lime sur la partie travaillée, de façon à enlever autant que possible les aspérités produites par le burin.

On a soin également d'arrondir légèrement les angles vifs des trous percés dans la chaudière, afin d'enlever toutes les bavures laissées par le foret.

Toutes les parties assemblées de la chaudière devant former joint sont matées intérieurement et extérieurement.

Le matage est fait de façon à refouler le métal sur la ligne du joint en évitant d'entailler la tôle inférieure.

Pour le matage des tôles, on emploie d'abord le matoir plat, présentant une base de 18 × 7 mm. environ, qui refoule le métal sans s'imprimer dans la tôle, et on termine le travail avec un matoir allongé dont le bec, qui n'a guère que 2 mm. de largeur, est légèrement arrondi pour éviter l'entaillage de la tôle.

Dans les endroits où le collage n'est pas parfait, dans les pinces, par exemple, on emploie le matoir rond, présentant un arrondi de 7 ou 8 mm., et on régularise ensuite le matage au moyen du matoir plat.

Les matoirs pour rivets ont la forme d'une gouge.

Les rivets posés à la main sont matés intérieurement et extérieurement ; ceux posés à la machine sont matés à l'extérieur seulement.

Nota. — D'une façon générale il a semblé que, dans la construction des chaudières en acier, on devait employer les procédés qui fatiguent le moins le métal.

C'est pourquoi on a adopté pour les travaux exécutés par les ateliers de la Compagnie :

Le chauffage au four et l'emboutissage à la presse hydraulique toutes les fois qu'il est possible de le faire ;

Le chanfreinage mécanique au lieu du chanfreinage au burin ;

L'emploi de chaînes et de tendeurs pour rapprocher les tôles au lieu de broches et de tirants ;

Le recuit des tôles assemblées, en un four spécial, dans le but de supprimer les tensions du métal résultant, soit d'inégalités de chauffe dans certaines parties, soit du travail même qu'on a fait subir aux tôles, comme l'étirage des pinces et le collage au marteau ;

Le rivetage hydraulique, dans toutes les parties où il est possible de l'employer, au lieu du rivetage à la main.

Ceux de ces procédés qui paraissent les plus importants pour la sécurité sont imposés par les cahiers des charges pour la construction des chaudières en tôle d'acier.

Chemins de fer P.-L.-M. — Le travail d'emboutissage des tôles doit être fait autant que possible à la presse et avec le plus grand soin. Les tôles devant être embouties sont chauffées dans un four dormant; uniformément dans toutes leurs parties et au même degré, soit au rouge cerise clair, dans toutes les chaudes. On ne les travaille plus lorsque leur température est descendue au-dessous de celle du rouge sombre.

Toutes les tôles entrant dans la composition de la chaudière sont d'abord façonnées, ajustées et assemblées complètement à l'aide de faux boulons. Dans cette première opération, on perce les trous de rivets au foret à un diamètre inférieur à 2 mm. à celui qu'ils doivent avoir définitivement. On désassemble alors les tôles et on procède à leur recuit dans un four à calotte mobile donnant une chaleur uniforme dans toutes ses parties, en entretoisant les plus sujettes à se déformer et en recouvrant les champs des tôles pour le protéger contre l'action trop directe du feu.

Le feu est conduit de façon à atteindre la température du rouge-cerise clair au bout de quinze à dix-sept heures de chauffe. A ce moment, le feu est éteint et, afin d'empêcher la température de monter davantage, on soulève la calotte du fond de quelques centimètres pendant un temps suffisant pour que la couleur des tôles commence à s'assombrir, puis on ferme toutes les issues du four et on laisse le recuit se prolonger pendant quarante-huit heures environ. On défourne lentement; les déformations qui peuvent s'être produites pendant ce recuit, sont rectifiées à l'aide d'une large chasse à parer après avoir fait chauffer les tôles au rouge sombre au moyen de bois ou de charbon de bois.

A la suite de ce recuit, la chaudière étant réassemblée, les trous sont alésés au diamètre définitif au moyen d'alésoirs ou de forets hélicoïdaux; ils doivent coïncider parfaitement. L'emploi du poinçon n'est toléré, pour le découpage des ouvertures dans les tôles des chaudières, que sous la réserve qu'il reste une bande de 10 mm. au moins entre les bords des trous de poinçon et le tracé définitif; cette bande de 10 mm. ne peut être enlevée qu'avec des outils tranchants.

185. Foyers. — On n'emploie, pour la construction des foyers, que le cuivre rouge ou l'acier; le premier de ces métaux est universellement adopté en Europe, à part quelques expériences isolées dont nous parlerons; le second est d'un usage absolument général aux Etats-Unis où l'on ne compte plus actuellement un seul foyer en cuivre. Le fer a été essayé autrefois par les Américains, lors de la période de transition qui les a conduits à l'adoption de l'acier, mais sans succès, ce métal, trop pailleux, étant sujet à des dessoudures donnant naissance à des poches suivies de dédoublures des tôles.

Le cuivre doit surtout la préférence dont il est l'objet en Europe à sa moindre sensibilité aux refroidissements brusques auxquels sont soumis les foyers et dus aux rentrées d'air par la porte, ou à la vidange rapide et au lavage à l'eau froide des chaudières dans les dépôts. Il est, en outre, moins attaquable par corrosions dans le voisinage des fuites d'eau ou de vapeur. L'acier ne donne de bons résultats qu'au prix de soins particuliers comme nous le verrons; il offre l'avantage de s'amincir et de se détruire moins vite que le cuivre aux points en contact avec le charbon.

On exige ordinairement que le cuivre employé pour la construction des foyers soit extrêmement pur et donne une résistance moyenne, par millimètre carré, de 20 à 23 kg. avec un allongement de 22 à 30 0/0. Nous

donnons ci-dessous un résumé des prescriptions imposées par quelques-unes des principales administrations pour la fourniture des cuivres de foyer [1].

Chemins de fer de l'Ouest. — Le cuivre rouge sera de la meilleure qualité en usage et ne pourra avoir d'autres provenances que celles spécialement agréées par la Compagnie. Il devra être parfaitement pur, affiné avec le plus grand soin et ne pas contenir plus de quatre dixièmes pour cent (0,4 0/0) de matières étrangères (dont au maximum cinq centièmes pour cent (0,05 0/0) de soufre, à l'exclusion de l'oxydule de cuivre, du phosphore, de l'antimoine, de l'arsenic et du bismuth qui ne seront pas tolérés.

Les plaques devront être saines, exemptes de piqûres, rayures, pailles, criques, fissures, dartres, manque de matière ou autres défauts pouvant nuire à leur solidité ou à leur aspect.

Les plaques devront être bien décapées et présenter des surfaces parfaitement propres.

Les plaques devront être parfaitement dressées et d'épaisseur uniforme : il est accordé une tolérance de quatre dixièmes en plus sur l'épaisseur sans aucune tolérance en moins.

Essais. — Les essais ont lieu dans les proportions suivantes :

Essai à la traction, 1 par plaque ;
Essai de pliage, 1 par lot de 20 plaques ;
Essai de composition chimique, 1 par lot.

Les éprouvettes de traction de 200 mm. de longueur utile auront une section carrée de côté égal à l'épaisseur de la plaque (pour les plaques d'épaisseur inférieure à 25 mm. la section aura 25 mm. de largeur ; l'épaisseur sera celle de la plaque).

Les charges de rupture et les allongements mesurés dans les 100 mm. comprenant le point de rupture devront atteindre au moins 22 kg. et 38 0/0. Il est admis une tolérance de 1 kg. en moins sur les charges de rupture à condition que cette insuffisance soit compensée par 1 0/0 en plus d'allongement. De même il est admis une tolérance de 20 0/0 en moins sur les allongements, à la condition que chaque centième en moins soit compensé par 1 kg. de charge de rupture en plus.

Un morceau de 250 mm. de longueur et de 40 mm. de largeur est prélevé à froid et doit pouvoir supporter un pliage à bloc ; les côtés ne doivent pas être arrondis, mais on peut enlever l'acuité des angles à la lime douce.

Une bande de 200 mm. + 60 mm. prélevée à froid est percée d'un trou de 21 mm. de diamètre qui doit pouvoir être agrandi à froid jusqu'à 40 mm. au moyen d'un mandrin ayant une conicité de 1/10, sans manifester aucune crique ni indice de rupture.

Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée. — Le cuivre rouge doit être de la qualité supérieure dite *corocoro* à l'exclusion formelle de toute autre origine. Le métal est coulé à la poche dans des lingotières au sortir du four à affiner. Les lingots doivent être sains, exempts de soufflures, piqûres, etc., et ceux qui présenteraient des traces de reprises sont éliminés de la fabrication.

Essais. — Les éprouvettes de traction ont la forme de barreaux prismatiques à section rectangulaire ; la longueur de la partie prismatique soumise à la traction doit être d'au moins 200 mm. La section du prisme doit être d'environ 500 mm², à moins que l'échantillon à essayer n'ait une section inférieure à ce minimum, auquel cas la section en millimètres carrés doit être liée à la longueur (en millimètres) par la relation $l = \sqrt{80s}$.

Les barreaux sont soumis à des efforts de traction croissante jusqu'à ce que la rupture ait lieu.

[1] Voir le rapport très complet de M. Hodeige (Renseignements techniques relatifs aux foyers des locomotives), présenté à la cinquième session du Congrès international des chemins de fer. Voir aussi le rapport de M. Sauvage cité plus loin.

La charge initiale par millimètre carré de la section primitive du barreau est de 19 kg. Cette charge doit être maintenue en action pendant cinq minutes ; des charges complémentaires de 500 gr. sont ensuite ajoutées de minute en minute.

La charge moyenne de rupture pour l'ensemble des barreaux afférents à un même lot ne doit pas être inférieure à 22 kg. par millimètre carré de la section primitive. En outre, aucun barreau isolé ne doit rompre sous une charge inférieure à 20 kg. par millimètre carré de sa section primitive.

L'allongement moyen sous la charge de rupture ne doit pas être inférieur à 22 p. 100 de la longueur primitive et l'allongement minimum que doit présenter un barreau quelconque isolé ne pas être inférieur à 18 p. 100 de sa longueur primitive.

Chemins de fer de Paris a Orléans. — Le cuivre rouge doit être parfaitement homogène et très malléable, sa cassure fraîche doit être rose et soyeuse ; il ne doit pas contenir d'oxydule : s'il en contenait des traces, la quantité maximum ne devrait pas dépasser 2 millièmes ; il ne doit renfermer aucun des corps suivants : plomb, fer, antimoine, arsenic, soufre, etc. ; s'il en contenait quelques traces, la totalité ne devrait pas être inférieure à 1 millième : il peut par exception contenir de l'étain, mais la tolérance pour ce corps ne sera que de 2 millièmes ; la totalité des impuretés, de quelque nature qu'elles soient, ne devra pas dépasser 5 millièmes.

Les lingots doivent être parfaitement homogènes sans reprises, impuretés ou autres défauts, et devront présenter une surface bien saine, exempte de soufflures et piqûres.

Les surfaces des plaques seront décapées, propres, lisses et exemptes de piqûres, gerçures, manque de matières ou autres défauts pouvant nuire au bon service des pièces ; aucune tolérance en moins sur les épaisseurs ne sera admise, mais on peut accorder une tolérance de 1 mm. en plus pour les épaisseurs supérieures, à 25 mm. et de 1/2 mm. pour les épaisseurs moindres.

Les éprouvettes de traction découpées à froid auront 200 mm. de longueur utile et seront recuites ; leur épaisseur sera celle des plaques et elles auront 20 mm. de largeur. La résistance à la rupture devra être d'au moins 22 kg. par millimètre carré de section avec un allongement de 30 0/0 au minimum et de plus l'éprouvette devra présenter une diminution de section à l'endroit de la rupture ou striction de 50 0/0 au moins.

Des bandes d'essai de 30 mm. de largeur devront pouvoir subir à froid un pliage complet sans se criquer ni se fendre.

En étirant des bandes au marteau de façon à amincir leurs extrémités en forme de pince, le métal ne devra ni se criquer ni se gercer.

Chemins de fer du Midi. — Le cuivre sera de première qualité ; les surfaces des plaques seront décapées, propres, lisses, exemptes de piqûres, gerçures, manque de matières ou autres défauts.

Les épaisseurs seront régulières. Une tolérance de 1 mm. en plus de celles indiquées est admise pour les épaisseurs de 25 mm. et au-dessus et de 1/2 mm. pour les épaisseurs moindres. Il n'est pas accordé de tolérance en moins.

L'éprouvette de traction découpée dans une bande adhérente à la plaque, et non recuite devra présenter à la rupture une résistance de 20 kg. au minimum par millimètre.

Un tronçon prélevé dans une bande adhérente à la plaque, de 150 mm. de longueur et et de 50 à 60 mm. de largeur sera plié en son milieu à froid, sur la moitié de la circonférence cylindrique d'un mandrin d'un diamètre égal à une fois et demie l'épaisseur de la bande et de telle manière que les deux moitiés de l'éprouvette arrivent au parallélisme. Ce pliage devra s'effectuer sans criques ni fissures.

L'éprouvette ayant supporté avec succès l'épreuve de pliage à froid sera chauffée au rouge sombre et le pliage sera continué à cette dernière température jusqu'à ce que les deux moitiés de l'éprouvette viennent à se toucher sur toute leur longueur sans qu'il se manifeste de commencement de criques, fentes ou fissures.

Chemins de fer de l'État français. — Le cuivre rouge, à quelque emploi qu'il soit destiné, devra être parfaitement pur et de premier choix, au moins équivalent à la qualité dite *corocoro*.

Spécialement pour la construction des parois intérieures du foyer, des entretoises des parois de la boîte à feu, des rivets assemblant les plaques en cuivre du foyer, des plaques tubulaires du foyer et de la boîte à fumée, le cuivre rouge devra être de qualité tout à fait supérieure, le travail d'affinage ne devra laisser que des traces d'oxydes dissous et les corps étrangers ne devront également s'y trouver qu'à l'état de traces.

Les barreaux d'épreuve seront découpés à froid dans les pièces même présentées à la réception; ils ne devront subir aucun chauffage ou recuit supplémentaires. La charge minimum de rupture des éprouvettes à la traction sera de 20 kg. par millimètre carré de la section initiale pour les plaques de foyer et les plaques tubulaires et de 22 kg. pour les barres d'entretoises et les rivets; l'allongement sera au minimum de 30 p. 100 dans tous les cas.

La ductilité des cuivres rouges sera constatée par les essais suivants :

Des bandes de section rectangulaire de 30 mm. de largeur, à l'épaisseur des feuilles, seront découpées dans les plaques et finies avec soin; les angles formés par les arêtes seront légèrement adoucis à la lime sans être arrondis.

Ces bandes seront pliées en leur milieu jusqu'à amener les deux branches exactement en contact et sur toute leur longueur. Aucune crique ne devra se déclarer pendant cette opération.

Chemins de fer de l'État belge. — Le cuivre rouge doit être de première qualité, parfaitement pur, parfaitement malléable et ne contenir de métaux étrangers ou d'oxydes dissous qu'à l'état de traces. Sa densité devra être de 8,88 et le poids des plaques par millimètre carré doit être celui qui résulte de cette densité avec une tolérance de 5 0/0 en plus ou en moins.

Les plaques auront une surface bien nette exempte de piqûres, pailles, dartres, doublures ou autres défauts.

Des barreaux d'essais de traction, prismatiques, de 20 cm. de longueur et de section rectangulaire dont la largeur sera égale à deux fois l'épaisseur, découpés dans les plaques suivant une direction quelconque, étant soumis à l'action d'un effort de traction devront supporter, avant rupture, une charge minimum de 22 kg. par millimètre carré de la section primitive et présenter un allongement d'au moins 22 0/0 de la longueur prismatique.

La surface entière de la partie centrale des barreaux d'essai sera dressée et polie de façon à faire disparaître toute aspérité ou inégalité, la croûte superficielle de chacune des deux larges faces ayant été enlevée jusqu'à la profondeur d'au moins 1 demi-millimètre.

La charge initiale par millimètre carré de la section primitive du barreau sera de 19 kg., les charges supplémentaires seront de 500 gr. environ pour chaque millimètre carré et ajoutées à des intervalles d'une minute.

Des bandes découpées dans les plaques, suivant une direction quelconque, devront se replier sur elles-mêmes autour d'un mandrin d'un diamètre égal à la moitié de l'épaisseur de la plaque sans que la surface extérieure présente de criques ou de fissures.

Des bandes découpées dans les plaques, suivant une direction quelconque, et chauffées au rouge sombre, devront se replier sur elles-mêmes autour d'un mandrin d'un diamètre égal à la moitié de l'épaisseur de la plaque sans que l'extérieur présente de criques ou déchirures.

Des cassures obtenues au moyen du marteau après qu'un coup de tranche aura été donné devront présenter une texture d'un rouge rosé à nerfs parfaitement uniformes et à reflets d'aspect soyeux.

Midland Ry. — Les plaques et les barres doivent pouvoir supporter un pliage à bloc sans qu'il se manifeste comme trace de déchirure. Une bande de 0,75 m. de long sur 0,064 m. de largeur sera découpée dans chaque plaque et envoyée au service central pour essais.

Les plaques devront présenter une résistance à la rupture de 22 kg. par millimètre carré avec 36 0/0 d'allongement ; les barres devront présenter une résistance à la rupture de 23 kg. par millimètre carré.

London and South Western Ry. — Les plaques de cuivre seront de la meilleure qualité en usage et proviendront de fournisseurs agréés par l'ingénieur en chef du matériel et de la traction. Elles seront conformes aux indications des dessins en ce qui concerne la forme et l'épaisseur.

Les plaques seront convenablement recuites ; une bande prélevée sur chaque plaque donnera les résultats suivants :

La résistance à la traction sera de 22 kg. au moins avec un allongement maximum de 40 0/0, mesuré sur 51 mm.

Une bande de 152 mm. devra pouvoir être pliée à bloc, à froid, sans qu'il se manifeste aucun signe de rupture à l'endroit du pliage.

North Eastern Railway. — Les plaques doivent résister à un effort de traction de 21,7 à 24 kg. par millimètre carré de section. L'allongement, mesuré sur une longueur de 102 mm., doit atteindre au minimum 45 0 0.

Une éprouvette doit pouvoir être pliée à froid sur elle-même jusqu'à ce que les surfaces viennent en contact, sans qu'il se manifeste aucun signe de rupture.

Une éprouvette de 75 mm. de largeur est percée de part en part d'un trou de 16 mm. : ce trou doit pouvoir être élargi à froid et porté à 38 mm. sans que l'éprouvette présente de trace de rupture.

North British Railway. — Une éprouvette doit pouvoir se replier sur elle-même à froid, jusqu'à ce que les surfaces viennent en contact, sans présenter de trace de rupture. Le cuivre doit pouvoir résister à un effort de traction d'au moins 22 kg. par millimètre carré de la section primitive.

L'allongement, mesuré sur une longueur de 51 mm., doit être au minimum de 50 0 0.

Chemin de fer du Vladicaucase. — Les plaques de la boîte à feu doivent être en cuivre rouge d'excellente qualité, au point de vue de la ténacité, de la malléabilité et du poli. La surface des plaques doit être sans fissures, pailles, écorchures ou autres défauts.

Des échantillons pris dans les plaques doivent présenter une résistance minimum de 20 kg. par millimètre carré de la section primitive, un allongement de 35 0/0 et une contraction de 40 0/0 au minimum.

En outre, les éprouvettes doivent pouvoir se plier de 100 degrés, à froid. Au rouge sombre, elles doivent se plier complètement sans fissures.

Chemin de fer de Moscou-Brest. — Le cuivre doit être forgé et ductile. La cassure doit être de couleur rougeâtre-rose, à grains fins et compacts ou filamenteux et mats.

Toutes les dimensions des tôles sont de rigueur.

La surface des tôles doit être nette et lisse, sans fentes, boursouflures ou creux, pailles ou autres défauts.

Les tôles, tant à froid qu'à chaud, doivent pouvoir être embouties à leur forme définitive sans se fendre ou montrer d'autres défauts.

Les tôles sont soumises aux essais suivants : on découpe dans chaque feuille une bande de 40 mm. de largeur et de 300 mm. de longueur, dont on arrondit les arêtes. Cette bande doit pouvoir être repliée complètement sur elle-même sans présenter la moindre trace de rupture.

La résistance à la traction ne doit pas être inférieure à 20 kg. par millimètre carré de la section primitive.

L'allongement ne peut être inférieur à 30 0/0.

186. Emploi de l'acier pour les foyers. — Depuis une trentaine d'années, les Américains[1], par raison d'économie, ont renoncé aux foyers en cuivre qu'ils employaient universellement à cette époque, pour leur substituer, d'une manière non moins générale, les foyers en acier. Ils éprouvèrent aux débuts les mêmes déboires que les ingénieurs européens qui se sont livrés aux tentatives de ce genre : les plaques se criquaient aux trous de rivets et aux trous de tubes, et quelquefois se fendaient brusquement suivant toute leur largeur. Grâce à leur opiniâtreté qui leur révéla peu à peu les moyens de remédier aux inconvénients que présentait l'acier pour cet usage, aux perfectionnements de la fabrication dirigés vers la production d'un acier spécial, enfin aux précautions prises pour le lavage des chaudières, à des réparations et à de nombreux rapiéçages que l'on ne fait guère en Europe dans les foyers en cuivre, ils sont parvenus à obtenir, de leurs foyers en acier, des parcours à peu près égaux à ceux que donnent les foyers en cuivre. Toutefois, l'emploi de l'acier semble toujours comporter une certaine incertitude que ne présente pas le cuivre, et la durée des foyers américains est des plus variables. Certains ne durent pas au delà de deux ou trois ans, alors que d'autres, de forme identique, construits avec un métal provenant des mêmes sources, peuvent durer une douzaine d'années.

Toutes les spécifications pour tôles d'acier destinées à la construction des foyers prescrivent, indépendamment d'essais de flexion à chaud, à froid et après trempe, des essais à la traction sur des éprouvettes prises en long et n'ayant subi aucun recuit depuis le passage au laminoir. Généralement, elles demandent une résistance de 38 à 40 kg. avec un allongement de 30 à 33 0/0 sur une longueur de 0,102 m. comprenant la section de rupture. On rejette ordinairement les tôles dont la résistance est inférieure à 35 kg. ousupérieure à 42 kg., ou encore dont l'allongement serait inférieur à 28 0/0.

Quelques Compagnies prescrivent des analyses chimiques et, en tout cas, attachent de plus en plus d'importance à cet essai. Le *Pensylvania* demande les compositions suivantes :

Carbone	0,15 à 0,18 0/0
Phosphore (au plus)	0,02 »
Manganèse	0,25 »
Silicium	0,03 »
Soufre	0,02 »
Cuivre	0,03 »

[1] Voir à ce sujet l'article fort intéressant paru dans la *Revue générale des Chemins de fer*, numéro de mars 1893 : *De l'emploi de l'acier pour la construction des foyers de locomotives*, par M. Chabal, ingénieur en chef adjoint du matériel et de la traction des Chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée, auquel nous avons fait plusieurs emprunts. Voir aussi le rapport de M. G. Whaley, commissaire-rapporteur à l'Exposition de Chicago.

Mais, en pratique, cette Compagnie montre des exigences un peu moins grandes et admet que la teneur en carbone puisse s'élever jusqu'à 0,22 0/0 et tolère jusqu'à 0,04 de phosphore, 0,30 de manganèse et 0,04 de soufre 0/0.

Le *Chicago Burlington and Quincy Railroad* prescrit que la teneur en carbone sera aussi faible que possible et que les autres matières ne devront pas excéder les maxima ci-après :

Phosphore	0,03 0/0
Manganèse	0,35 »
Silicium	0,03 »
Soufre	0,03 »
Cuivre	0,04 »

Les ingénieurs américains redoutent surtout le phosphore et le soufre.

Les tôles pour foyer sont toutes, aujourd'hui, fabriquées au four Siemens-Martin, quelquefois sur sole basique, plus souvent sur sole acide. On traite des fontes très pures et des fers puddlés obtenus dans l'usine avec des fontes également très pures. Les lingots sont laminés au jaune clair et passés vivement au laminoir ; le laminage est terminé à un rouge un peu plus sombre que ce qui est l'habitude en France.

On a vu, par les descriptions qui précèdent, que les tôles des foyers américains sont extrêmement minces, et on attribue même leur durée à leur faible épaisseur. Les plaques tubulaires ont généralement un demi-pouce, soit 12,7 mm., les côtés et la plaque arrière 5/16 de pouce ou 7,9 mm., et le ciel 3/8 de pouce ou 9,5 mm.

La mise en œuvre des tôles pour foyer ne se fait pas, aux Etats-Unis, avec tout le soin que l'on croit devoir, en France, apporter à des travaux de ce genre. Les tôles sont découpées à la cisaille et perçées à la poinçonneuse ; presque partout encore, sauf dans les nouveaux ateliers du *Pensylvania Railroad*, à Altoona, l'emboutissage se fait à la main. On ne recuit pas généralement, la chaude donnée pour le parage définitif de la tôle étant considérée par la plupart des constructeurs comme suffisante à ce point de vue. D'ailleurs les Américains paraissent peu partisans du recuisage lent qui, suivant eux, détruirait la qualité du métal.

En revanche, dans le service courant, on apporte un grand soin au lavage des chaudières et on surveille de très près les foyers pour arrêter à temps les fissures qui peuvent se produire. Les lavages, comme les remplissages, se font à l'eau chaude. Les Américains pensent que la plupart des ennuis qu'ont donnés les foyers en acier proviennent de refroidissements brusques causés par des vidanges trop rapides des chaudières ou des lavages à l'eau froide.

La durée des foyers en acier est, nous l'avons dit, plus variable que celle des foyers en cuivre ; ajoutons que ces foyers ne périssent pas comme

les nôtres et que leur durée n'est souvent que le résultat de réparations très hardies, inconnues en Europe. Quand une fente se produit, si elle entraîne une fuite, on l'arrête en perçant un trou à son extrémité et on bouche toute la fente jusqu'à ce trou par un chapelet de prisonniers empiétant l'un sur l'autre et matés. On trouve en service des foyers qui ont ainsi un nombre considérable de fentes ainsi réparées. Ces fentes se produisant généralement au bout d'un ou deux ans, c'est seulement plus tard, lorsqu'elles sont devenues trop nombreuses et importantes, que l'on se décide à mettre des pièces, celles-ci prenant parfois la plus grande partie de la surface des tôles.

Il n'est pas rare de constater l'existence d'une petite pièce rapportée sur une pièce plus grande ou bien d'une deuxième pièce faisant suite à une première qu'elle recouvre en partie. Ce genre de réparation est d'un emploi courant aux Etats-Unis.

La durée moyenne des foyers en acier aux Etats-Unis paraît être d'une huitaine d'années, correspondant à un parcours de 320 000 km.

Les foyers en acier ont un grand avantage : ils sont beaucoup plus légers que les foyers en cuivre, grâce à leur plus faible épaisseur et à la moindre densité de l'acier, presque dans la proportion de 1 à 2, et cela peut être une précieuse qualité pour les locomotives express. Quant à l'économie qu'en peut donner l'emploi, il résulte du rapport de M. Chabal qu'elle serait assez illusoire, le cuivre, plus cher de premier achat, étant plus facile à travailler et moins coûteux à entretenir ; il conserve en outre, après sa mise au rebut, une valeur comme vieille matière que n'a pas l'acier.

L'emploi de l'acier pour la construction des foyers a été expérimenté à plusieurs reprises en Europe sur des locomotives avec un succès assez relatif, faute sans doute que les constructeurs et les Compagnies aient pu acquérir encore la pratique de ce métal dans cet emploi spécial, pratique que les Américains eux-mêmes ne sont arrivés à posséder qu'après de longs tâtonnements. Le personnel des dépôts n'est pas, moins encore que celui des ateliers, habitué aux précautions que nécessite l'emploi de l'acier pour le lavage des chaudières.

La Compagnie de *Lyon* a essayé l'emploi de l'acier sur une dizaine de locomotives ; les chemins de fer de l'*État prussien* et de l'*État norwégien* possèdent aussi quelques foyers en acier. Le *Great Eastern Ry* (Angleterre) a monté des foyers en acier sur une quarantaine de locomotives après avoir expérimenté ce métal sur une moindre échelle ; l'extension qui lui a été donnée récemment semble indiquer que cette tentative n'a pas été tout à fait infructueuse.

S'inspirant de la pratique américaine, la Direction des chemins de fer de

l'*Etat prussien*, à Hanovre, a fait construire, en 1891 et 1892, des chaudières de locomotives avec foyers en tôles d'acier mince; quelques chaudières en service furent également munies de foyers en acier[1].

Le timbre des chaudières est de 12,4 kg. ; les épaisseurs des tôles de foyer sont les suivantes : plaque tubulaire, 13 mm. ; face arrière, 10 mm. ; faces latérales du ciel de foyer, 9 mm. ; écartement maximum des entretoises, 100 mm.

Pour l'une des chaudières, l'épaisseur de la plaque tubulaire a été réduite à 10 mm. à titre d'essai.

Trois tubes à circulation d'eau supportaient les voûtes en briques, qui ne touchaient pas les parois du foyer : on évitait ainsi un chauffage inégal de ces parois.

Pour la construction des viroles du corps cylindrique, du foyer et de son enveloppe, on a employé des tôles d'acier doux, donnant dans les deux sens une résistance à la traction de 34 à 41 kg., avec 25 0/0 d'allongement mesuré sur 200 mm.

Des éprouvettes prélevées dans les deux sens, sur les tôles ou des fers façonnés, devaient pouvoir être pliées de 180°, suivant un rayon égal à l'épaisseur de la tôle (après avoir été réchauffées au rouge cerise et trempées, dans l'eau, à la température de 28°) sans qu'il se produise ni criques ni pailles.

L'acier devait se souder facilement.

Ces tôles ne devaient pas contenir plus de 0,04 0/0 de phosphore.

On a pris pour la mise en œuvre des tôles, à Hanovre, des précautions très minutieuses. Les tôles n'étaient pliées ou dressées qu'au rouge ou à froid. Les plaques embouties étaient travaillées avec des maillets en bois, puis recuites et refroidies lentement. Les viroles du corps cylindrique étaient cintrées à froid, et les tôles, découpées à la cisaille, étaient rabotées, le long de l'arête, d'une quantité égale au 1/5 ou au 2/5 de leur épaisseur. L'emploi de la tranche à froid et du marteau à frapper était prohibée, et quand le rabotage ne pouvait se faire à la machine on se servait de burins plats ou de bédanes, et de marteaux à main légers et de la lime.

En cas de chauffage partiel des tôles, le feu était disposé de façon qu'une zone de 150 à 200 mm., en dehors des points chauffés, pût passer graduellement du rouge à la température ambiante, afin de réduire au minimum les effets nuisibles dus aux tensions moléculaires ; il était interdit de limiter l'étendue de la surface à chauffer en plaçant des cendres mouillées sur la tôle.

Le poids et le prix de revient des chaudières se sont trouvés sensible-

[1] *Annales de Glaser*, 1er mai 1893.

ment moins élevés que ceux des chaudières de l'ancien type avec foyers en cuivre, joints à recouvrement et tôles d'épaisseurs proportionnellement plus fortes.

En service, on a reconnu qu'il fallait donner au feu une allure aussi régulière que possible, afin d'éviter le chauffage ou le refroidissement brusques des parois du foyer. Il est interdit de marcher avec la porte du foyer ouverte ou d'accumuler du charbon humide le long des parois du foyer. Les portes du cendrier et le souffleur doivent être fermés quand on enlève le mâchefer ou qu'on jette le feu ; la porte du foyer doit être également fermée dès que ces opérations sont terminées. L'emploi de l'eau froide pour le lavage de la chaudière est sévèrement interdit et il est recommandé de laisser en feu aussi longtemps que possible les machines qui sont en service.

Des fuites et des obstructions de tubes à circulation d'eau qui supportaient la voûte en briques, ont, dans la suite, amené leur suppression ; la voûte en briques a été placée sur des supports fixés contre les parois du foyer, sans qu'il en résulte d'inconvénients.

Il semble que les plaques tubulaires en acier doivent être préférables aux plaques en cuivre, parce que, grâce à leur plus grande résistance, on peut y mandriner les tubes plus fortement.

Si les plaques tubulaires ne paraissent pas donner lieu à des ruptures, les plaques latérales des foyers en acier subissent des amincissements assez considérables, dus à l'oxydation qui se produit au niveau de la grille ; cet inconvénient peut être diminué par l'emploi de l'équipe banale, qui permet de maintenir la machine plus longtemps en feu et d'éviter les refroidissements trop fréquents.

En somme, les foyers en acier ne présentent actuellement aucun inconvénient au point de vue de la sécurité, mais ils se détériorent rapidement : criques et fentes dans la plaque arrière, au cadre de la porte ; fuites aux emmanchements des tubes dans les plaques amenant des corrosions du côté du feu; corrosions des tôles du côté extérieur, particulièrement à la hauteur du dessus du cadre inférieur; fentes dans les flancs à peu près à mi-hauteur du foyer.

Il semble que le principal avantage du cuivre, pour la construction des foyers, consiste dans son peu de sensibilité aux refroidissements brusques et en ce qu'il ne demande pas, en service, à être traité avec les mêmes soins. Le succès de l'acier aux États-Unis provient beaucoup moins, à ce qu'il nous a paru, soit de la qualité du métal, soit de sa mise en œuvre, que des précautions particulières apportées dans les dépôts : lavage à l'eau chaude, etc.

N'oublions pas non plus de dire que les constructeurs des États-Unis sont arrivés à supprimer les fuites aux tubes par le procédé de fixation qu'ils em

ploient. Les tubes, en fer ou en acier, sont garnis extérieurement, dans la partie qui s'emmanche sur la plaque, d'une manchette en cuivre rouge qui, matée et serrée par le dudgeonnage, vient faire joint.

La question de l'emploi de l'acier pour les foyers nous paraît pouvoir se résumer brièvement comme suit :

Les foyers en acier sont plus légers et, malgré les précautions plus grandes nécessaires pour leur mise en œuvre, reviennent à un prix inférieur à celui des foyers en cuivre, mais ils n'ont plus de valeur comme vieilles matières.

Les foyers en acier sont plus sensibles à l'action des changements brusques de température et demandent de l'attention et du soin, de la part du personnel des machines et des dépôts ; ils ne peuvent avoir une durée suffisante que grâce à des lavages à l'eau chaude et à des précautions spéciales que nous avons signalées. Ils se rongent plus rapidement dans la région en contact direct avec le combustible.

D'autre part, la tenue des tubes, si on prend la précaution d'interposer un manchon en cuivre mince, paraît meilleure et plus durable sur des plaques en acier que sur le cuivre.

Aucun des résultats obtenus actuellement n'autorise à penser que l'acier est appelé à remplacer, en Europe, le cuivre pour la construction des foyers de locomotives.

187. Entretoises[1]. — Les entretoises du foyer se font en cuivre rouge lorsque le foyer est lui-même en cuivre, en acier quand les plaques sont confectionnées avec ce même métal. Les entretoises constituent un des organes importants de la chaudière ; il est de tout intérêt qu'elles ne se rompent pas en service bien que soumises à des efforts de flexion alternatifs, sous l'action des contractions et des dilatations du foyer qui les fatiguent beaucoup. Aussi, la plupart des Compagnies ont-elles jugé nécessaire de prescrire, pour leur réception, des conditions capables de leur assurer la qualité requise; nous donnerons ci-dessous des extraits des cahiers des charges de quelques administrations, relativement à la fourniture des entretoises en cuivre rouge.

Chemin de fer du Nord. — Le cuivre doit être parfaitement pur et provenir exclusivement du minerai Corocoro : la présence de métaux étrangers n'y sera qu'à l'état de traces. L'analyse chimique faite sur 0,5 gr. ne devra pas accuser de taches appréciables d'arsenic à l'appareil Marsh.

Les barres devront être parfaitement calibrées sur toute leur longueur; elles présenteront une surface parfaitement nette, exempte de pailles, fentes, piqûres ou autres défauts.

Elles ne devront pas être recuites après le dernier étirage, afin que la surface soit assez

[1] Voir encore le rapport de M. Hodeige cité plus haut.

dure pour supporter le filetage qui devra pouvoir être effectué sans que les filets présentent de traces d'arrachement ni d'égrènement.

Les barreaux d'épreuve de traction, cylindriques, auront 15 mm. de diamètre et la longueur soumise à l'essai sera exactement de 100 mm.

La charge de rupture pour l'ensemble des barreaux afférant à un même lot ne devra pas être inférieure à 24 kg. par millimètre carré de la section initiale.

L'allongement moyen correspondant mesuré sur 100 mm. sera de 24 0/0.

Aucun des chiffres obtenus aux essais ne devra descendre en dessous de 20 kg. pour la charge de rupture et de 20 0/0 pour l'allongement.

Des bouts découpés dans les barres seront ployés en leur milieu de manière que les deux branches soient amenées au contact sur toute leur longueur; le métal devra supporter cette épreuve sans se criquer. Le même essai sera répété sur des bouts préalablement filetés au pas des entretoises.

Pour s'assurer que les barres ne sont pas fendues, on prélèvera à chacune de leurs extrémités un bout de 50 mm. de longueur, qui sera percé, suivant son axe, d'un trou de 8 mm. de diamètre sur 30 mm. de profondeur; on enfoncera un poinçon conique, à coups de marteau dans ce trou, de façon à ouvrir le métal et le bout de barre ne devra présenter aucune fente ni déchirure lorsque le diamètre du trou sera porté à 16 mm. L'essai pourra être poussé jusqu'à la rupture, et le métal devra se déchirer en un seul endroit présentant une cassure soyeuse exempte de tout défaut.

Chemins de fer de l'Est. — Les conditions relatives à la qualité du métal sont les mêmes que pour les plaques (voir ci-dessus).

Il est formellement interdit de recuire les barres après le dernier étirage, afin que la surface reste dure et puisse supporter convenablement le filetage.

Les barres doivent avoir une surface nette, elles seront droites, exemptes de pailles, piqûres, fentes, incrustations d'oxyde, dartres, manques de matière, soufflures ou autres défauts.

Elles seront cylindriques et de diamètre identique sur toute la longueur.

Il est admis une tolérance de 2/10 de millimètre en plus ou en moins sur le diamètre. L'ovalisation ne pourra pas dépasser cette limite.

Les barres devront avoir une longueur d'au moins 4,00 m.

Les bouts seront affranchis au moyen de la scie circulaire. Les morceaux pour essais seront détachés au moyen du marteau, après qu'une saignée circulaire aura été pratiquée à la tranche.

La cassure ainsi obtenue doit présenter une texture parfaitement homogène, d'un rouge pâle, à grain fin.

Les essais ont lieu dans la proportion suivante :

Essai par traction	1 sur 50	barres.
— de poinçonnage	1 — 25	—
— de filetage	1 — 50	—
— de pliage	—	—
— de composition chimique	—	—

Ces essais de traction peuvent être effectués sur des bouts de barres ou sur des barreaux tournés avec partie réduite suivant le mode d'attache aux griffes de la machine d'essai.

Les allongements pour chaque section de barreau seront relevés d'après la formule $l = \sqrt{100\,S}$.

Les conditions de résistance et d'allongement pour l'ensemble des barreaux d'un même lot sont les suivantes :

Moyenne minimum : 24 kg. par millimètre carré de la section primitive avec allongement de 26 0/0.

Aucun barreau isolé ne devra donner moins de 22 kg. de résistance par millimètre carré de section et 24 0/0 d'allongement.

Pour s'assurer que les barres ne sont pas fendues, on enfoncera dans un bout de barre percé d'un avant-trou de 6 mm. de diamètre (égal à celui des entretoises) un poinçon conique à angle de 60°. L'enfoncement de ce poinçon sera poursuivi jusqu'à ce que le métal présente des traces de fissures dans le sens longitudinal; à ce moment, la pénétration du poinçon sera exactement relevée.

Un bout de barre d'environ 200 mm. sera fileté sur le tour, au pas et au profil adopté par la Compagnie pour les entretoises qu'elle emploie.

Ce filetage devra être effectué en deux passes seulement : dans la première, l'entretoise sera chariotée sur toute sa longueur; dans la seconde, le filet sera produit d'un même coup avec le profil définitif.

Les filets devront être parfaitement lisses, sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement de la matière, sans fissures longitudinales, stries ou autres défauts.

Ce bout de barre fileté sera ployé en son milieu, de manière que les deux branches arrivent à bloc et se touchent exactement en ligne droite.

Le métal ne devra pas présenter de crique ou fissure sérieuse.

Chemins de fer de l'Ouest. — Même qualité de métal que pour les plaques.

Les barres devront être dressées et d'épaisseur uniforme sur toute leur longueur; il sera accordé les tolérances suivantes : 1/10 de millimètre en plus ou en moins sur le diamètre et 1/10 de millimètre d'ovale.

Les barres devront présenter une surface parfaitement lisse et ne pas être recuites après étirage à la filière afin que leur surface reste dure et puisse supporter convenablement le filetage.

Les éprouvettes de traction auront une section circulaire de 200 mm² ou se rapprochant autant que possible de ce chiffre; elles seront découpées, et façonnées entièrement à froid et, autant que possible, travaillées à la lime; si elles sont ébauchées à la machine-outil il conviendra de laisser toujours au moins 5/10 à prendre à la lime.

Dans aucun cas l'éprouvette ne devra être réchauffée, trempée, recuite ou martelée avant ou après tournage. Les repères extrêmes devront être placés à une distance des naissances des attaches ou des congés des têtes au moins égale au diamètre ou au plus grand côté de la section transversale de l'éprouvette.

Les charges de rupture par millimètre carré de section et les allongements mesurés dans les 100 mm. comprenant le point de rupture devront atteindre au moins 24 kg. et 40 0/0. Il sera admis une tolérance de 1 kg. en moins sur les charges de rupture à la condition que ce kilogramme soit compensé par 1 0/0 en plus d'allongement. De même il sera admis une tolérance de 2 0/0 en moins sur les allongements, à la condition que chaque centième en moins sur l'allongement soit compensé respectivement par 1 kg. de charge de rupture en plus.

Un morceau de 250 mm. de longueur sera prélevé à froid et devra pouvoir être plié à froid complètement sur lui-même jusqu'au contact des deux branches sans qu'il se manifeste aucune crique ni indice de rupture.

Chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée. — On exige la qualité de cuivre dite Corocoro à l'exclusion formelle de toute autre.

Le cuivre rouge destiné à la fabrication des barres pour entretoises est coulé d'un seul jet et sans reprises dans des lingotières cylindriques posées verticalement. Les lingots présentant des criques ou des fissures sont éliminés de la fabrication; ceux qui sont jugés sains sont burinés pour faire disparaître les pailles, soufflures et autres défauts de surface, avant et après le dégrossissage, les barres laminées sont recuites au rouge sombre, puis décapées à l'acide.

Le diamètre définitif est donné au moyen de la filière; l'étirage final ne doit pas

réduire le diamètre de plus de 1 mm. et demi. Il est interdit de recuire les barres après l'étirage final afin que la surface reste dure et puisse supporter le filetage.

Les éprouvettes de traction de forme cylindrique ont au minimum 200 mm. de longueur utile, la partie cylindrique doit avoir une section minimum de 500 mm², à moins que l'échantillon à essayer n'ait une section inférieure à ce minimum, auquel cas la section doit être liée à la longueur par la relation $l = \sqrt{80\,S}$ (l = la longueur en millimètres, S = la section en millimètres carrés).

La charge initiale par millimètre carré de la section primitive des barreaux d'essais est de 20 kg.; cette charge doit être maintenue en action pendant cinq minutes; des charges complémentaires égales à 500 gr. environ par millimètre carré de la section primitive, sont ajoutées à des intervalles de temps d'une minute.

La charge moyenne d'une rupture pour l'ensemble des barreaux d'un même lot ne doit pas être inférieure à 24 kg. par millimètre carré de la section primitive, l'allongement moyen correspondant sera de 24 0/0 de la longueur primitive. Aucun barreau ne doit rompre sous une charge inférieure à 22 kg. par millimètre carré de la section primitive l'allongement correspondant sera de 22 0/0 au minimum.

Des bouts de 150 mm. de longueur environ sont ployés en leur milieu de manière que les deux moitiés viennent se toucher exactement en ligne droite en conservant leur section circulaire; après l'opération le métal ne doit présenter ni criques ni fissures.

Des bouts de 300 mm. de longueur environ serrés dans un étau par une extrémité, sont tordus à l'aide d'un levier agissant à l'autre extrémité; ils doivent supporter, sans qu'il se manifeste aucune trace de déchirure, fissure ou autre défaut, trois portions successives de 36° chacune, à froid. Lorsqu'on fait chauffer les barres à la température du rouge sombre, le nombre de torsions doit être d'au moins cinq.

Des bouts de barres de 200 mm. de longueur environ sont filetés au tour de manière que le filet ait exactement le pas et le profil adoptés pour les entretoises. Ce filetage doit être produit en deux passes seulement : dans la première l'entretoise est chariotée sur toute sa longueur, dans la deuxième le filet est amené au profil définitif. Les entretoises finies doivent présenter des filets parfaitement lisses sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement de la matière et sans fissure longitudinale ou autres défauts pouvant nuire à la solidité.

La surface des barres doit être parfaitement nette sans aucune trace de fissures, de soudures, pailles ou autres défauts. Elles doivent être parfaitement calibrées sur toute leur longueur. Une cassure produite à chaque bout à la scie et au marteau doit présenter une texture d'un rouge pâle à grains fins, parfaitement uniforme; la rupture ne doit pas se produire brusquement et sans résistance sous l'action du marteau.

Chemin de fer de Paris a Orléans. — Le métal exigé est de la même qualité que celui des plaques de foyer (voir plus haut).

Les barres pour entretoises doivent être bien rondes et leur surface être parfaitement nette et exempte de pailles, fentes, piqûres ou autres défauts pouvant nuire à leur service.

Elles seront calibrées au dixième de millimètre près.

Elles devront être étirées à la filière en une seule fois au diamètre définitif après avoir été laminées à un diamètre plus grand de 1 mm². Elles ne devront pas être recuites après leur étirage, afin que leur surface reste dure et puisse supporter convenablement le filetage.

Le métal devra donner une résistance à la rupture d'au moins 22 kg. par millimètre carré de section avec un allongement de 30 0/0 au minimum et de plus une diminution de section à l'endroit de la rupture ou striction de 60 0/0 au moins. Les éprouvettes tournées à 16 mm. de diamètre environ auront 200 mm. de longueur utile; elles seront découpées à froid et non recuites.

Les barres devront subir à froid un pliage complet sans se criquer ni se gercer, sous peine de refus.

Après filetage les entretoises devront présenter des filets parfaitement lisses sans aucun arrachement et sans fissures longitudinales ou autres défauts pouvant nuire à leur solidité ou à leur service.

Chemins de fer du Midi. — Le cuivre rouge employé sera de première qualité ; il sera accordé une tolérance de 1 dixième de millimètre en plus ou en moins sur le diamètre qui varie de 20 à 32 mm. pour les barres pleines et de 20 à 31 mm. pour les barres creuses. Les barres seront écrouies de manière à supporter le filetage et le taraudage sans présenter aucune trace d'arrachement.

1° *Barres pleines.* — Les barreaux d'épreuve, cylindriques, seront tournés à un diamètre inférieur de 5 mm. à celui de la barre. Ils seront soumis à des efforts croissants de traction jusqu'à la rupture. A ce moment la charge obtenue ne devra pas être inférieure à 24 kg. par millimètre carré avec un allongement de 24 0/0 mesuré sur une longueur utile l (en millimètres) reliés à la section de l'éprouvette S (en millimètres carrés) par la relation $l = \sqrt{100\ S}$.

2° *Barres creuses.* — Les barreaux d'épreuve cylindriques seront tournés au plus grand diamètre possible ; leur longueur utile sera de 100 mm. Ils seront soumis à des efforts de traction croissant jusqu'à la rupture. A ce moment la charge obtenue ne devra pas être inférieure à 24 kg. par millimètre carré de la section initiale de l'éprouvette.

Un bout de barre de 150 mm. de longueur environ et non recuit devra être plié en son milieu à froid et au contact sans qu'il se produise aucune crique ou fissure à l'endroit de la pliure.

Chemins de fer de l'État. — Des bouts de barres de 150 mm. de longueur environ seront ployés en leur milieu, de manière que les deux moitiés se touchent exactement en ligne droite, en conservant leur section circulaire ; le métal ne devra manifester aucune trace de crique ni fissure.

La même opération sera exécutée sur des bouts préalablement filetés en deux passes, au pas des entretoises à l'exécution desquelles les barres doivent servir ; on ne devra pas constater de criques appréciables.

D'autres bouts de barres seront filetés en deux passes, sur 200 mm. de longueur environ. A la première, les barres seront chariotées ; à la deuxième, elles seront filetées au pas et au profil adoptés pour les entretoises finies. Le filet devra être parfaitement lisse et le métal ne devra offrir aucune trace d'égrènement ou d'arrachement et ne présenter ni fissures horizontales, ni autres défauts.

Les barres doivent offrir une résistance minima de 22 kg. par millimètre carré de la section initiale avec un allongement minimum correspondant de 30 0/0.

Chemins de fer de l'État belge. — Les barres doivent être exemptes de soufflures, criques, fissures, pailles, parcelles d'oxydes incrustées, piqûres et autres défauts apparents ; elles doivent avoir une surface parfaitement nette et être rigoureusement calibrées sur toute leur longueur.

Des barreaux d'essai de traction, cylindriques, tournés sur une longueur de 200 mm., étant soumis à l'action d'un effort de traction, devront supporter, avant rupture, une charge minimum de 24 kg. par millimètre carré de la section primitive et présenter un allongement d'au moins 24 0/0 de la longueur cylindrique.

La charge initiale par millimètre carré de la section primitive du barreau sera de 20 kg. Les charges supplémentaires seront de 500 gr. environ pour chaque millimètre carré et ajoutées à des intervalles d'une minute.

Des bouts de barres seront filetés en deux passes, au pas et au profil adoptés pour les entretoises de chaudières et les filets ainsi obtenus seront parfaitement lisses sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement de la matière.

Des cassures obtenues au moyen du marteau, après qu'une rainure circulaire aura été pratiquée au moyen de la tranche, devront présenter une texture d'un rouge rosé à grains fins uniformes et à reflets d'aspect soyeux.

London and South Western. — Les entretoises seront découpées dans des barres laminées de qualité supérieure ; le métal aura une résistance à la rupture d'au moins 22 kg. avec un allongement minimum de 40 0/0 mesurés sur 51 mm. ; les barres seront convenablement recuites.

North British Railway. — Une éprouvette doit pouvoir être pliée sur elle-même jusqu'au contact sans présenter de trace de rupture. La résistance à la traction doit être d'au moins 23,6 kg. par millimètre carré et l'allongement mesuré sur une longueur de 51 mm. d'au moins 50 0/0.

Glasgow and South Western. — Les barres pour entretoises présentent une résistance à la traction de 22 kg. par millimètre carré de section ; un allongement de 38 à 42 0/0 (mesuré sur une longueur de 200 mm.) et une contraction de la section de rupture de 52 à 60 0/0.

État roumain. — Les barres devront être parfaitement calibrées sur toute leur longueur ; elles présenteront une surface parfaitement nette, exempte de pailles, fentes, piqûres ou autres détériorations quelconques.

Elles ne devront pas être recuites après le dernier étirage, afin que la surface soit assez dure pour supporter le filetage. Quelques barreaux, du reste, pourront être filetés ; le filet devra être parfaitement lisse, sans aucune trace d'arrachement ou d'égrènement.

Les barreaux d'épreuve de traction seront cylindriques, terminés à leurs extrémités par des têtes permettant d'opérer la traction. Le diamètre de la partie tournée sera de 15 mm.

On prélèvera un barreau d'épreuve de traction pour une pièce unique ou pour un lot de dix barres.

La charge de rupture devra être de 25 kg. par millimètre carré de la section initiale. L'allongement correspondant sera de 27 0/0 et la contraction de 54 0/0.

Toutefois, il sera admis une tolérance de 2 kg. en moins sur la charge de rupture indiquée ci-dessus, à la condition que chaque kilogramme en moins soit compensé par 1 1/2 0/0 d'allongement et 3 0/0 de contraction en plus. De même, il sera admis une tolérance en moins de 2 0/0 sur l'allongement et de 4 0/0 sur la contraction, à la condition que les deux centièmes d'allongement et les quatre centièmes de contraction en moins soient compensés par 1 kg. de charge de rupture en plus.

Des bouts découpés dans une barre seront ployés en leur milieu, de manière que les deux branches soient amenées au contact sur toute leur longueur. Le métal, pendant cette opération, ne doit pas se criquer.

La même opération sera exécutée sur des bouts préalablement filetés au pas des entretoises, à l'exécution desquelles les barres doivent servir. On ne devra pas constater de criques sérieuses.

Pour s'assurer que les barres ne sont pas fendues, on prélèvera sur chaque barre, et à chacune de leurs extrémités, un bout de 5 cm. de longueur qui sera percé, suivant son axe, d'un trou de 3 cm. de profondeur et de 8 mm. de diamètre ; on enfoncera un poinçon conique, à coups de marteau, dans ce trou, de façon à ouvrir le métal, et le bout de barre ne devra présenter aucune fente ni déchirure lorsque le diamètre d'entrée du trou se trouvera porté à 16 mm. L'essai devra être poussé jusqu'à la rupture et le métal devra se déchirer en un seul endroit présentant une cassure soyeuse, exempte de tout défaut.

188. Tubes. — Pendant longtemps, on n'a employé, pour les chaudières locomotives, que des tubes en laiton, renfermant environ 30 0/0 de zinc; mais, depuis quelques années ce métal est peu à peu remplacé par le fer ou l'acier doux; il est appelé à disparaître à peu près complètement de la pratique des différentes administrations, en France et à l'étranger.

Les tubulures en laiton ont toujours coûté plus cher, jusqu'à deux fois plus, que les tubulures en fer ou en acier et, à moins que le combustible ne soit exceptionnellement sulfureux, elles s'usent plus vite. Le laiton devient en outre cassant vers 250° et peut donner lieu à des avaries et à des détresses en cours de route. Ajoutons que, le coefficient de dilatation de l'acier étant inférieur à celui du laiton, les tubulures confectionnées avec ce dernier métal exercent sur les plaques une moins grande poussée, d'où résultent une réduction de la fatigue de ces dernières et une moindre tendance aux fuites. L'emploi des tubes en fer et surtout en acier a donc été pour les Compagnies un élément tout à la fois d'économie et de sécurité. Les préventions dont ils ont si longtemps été l'objet provenaient de ce qu'ils passaient pour s'entartrer plus vite, ce que la pratique n'a nullement vérifié, et qu'ils donnaient souvent lieu à des fuites aux assemblages des tubes sur les plaques, fuites déterminant une oxydation des extrémités de ces tubes. On pouvait d'ailleurs éviter ces inconvénients en exigeant que les tubes fussent livrés avec une surface très lisse, ou par un lavage plus fréquent et plus méthodique des chaudières, ce qui n'eût pas été un mal au contraire et par le raboutage, vers l'arrière, d'une manchette en cuivre rouge placée du côté du foyer.

Quoi qu'il en soit, à l'heure actuelle, toutes les administrations de chemins de fer, en France et à l'étranger, viennent rapidement à l'emploi de l'acier pour leurs tubes de chaudières et la plupart d'entre elles ne commandent plus de tubes en laiton. La hausse considérable du prix des cuivres qui s'est produite en 1888 paraît avoir été la cause prédominante de la généralisation des tubes en acier doux sur les machines de construction française.

Aux Etats-Unis, on donne la préférence au fer fin au bois — à part le *New York Central* qui emploie des tubes en acier doux; — le fer est aussi usité par quelques administrations européennes; ainsi, les chemins de fer de l'*Etat belge* emploient l'acier pour les machines attachées à des régions où les eaux sont bonnes et réservent le fer pour les autres.

En Angleterre, on emploie, concurremment avec les tubes en laiton, des tubulures en cuivre durci (*red metal*), en fer et en acier très doux. La Compagnie du *Brighton* a fait l'application de tubes en acier dès l'année 1880.

Nous donnons ci-après quelques extraits des cahiers des charges des principales administrations relatives à la fourniture des tubes en acier au fer[1] :

[1] Voici à ce sujet le rapport très complet de M. Sauvage à la cinquième session du *Congrès international des Chemins de fer*, auquel nous sommes redevable de beaucoup de renseignements.

Chemins de fer de l'Est. — Les surfaces des tubes doivent être parfaitement nettes, sans pailles, criques, gales, éraflures, dessoudures, fissures ou autres défauts.

Les tubes doivent être parfaitement dressés, sans courbure totale de plus de 12 mm. de flèche, ni ondulation locale dépassant 3 mm. de flèche pour 1 m. de longueur considérée.

Les tubes seront bien cylindriques, sans ovalisation, sur quelque point de leur longueur, dépassant les limites ci-après. Leur diamètre extérieur doit être conforme à la demande et identique sur toute la longueur.

Pour être reçu, chaque tube devra, dans toute sa longueur, entrer dans le calibre maximum sans pouvoir pénétrer dans le calibre minimum.

Les limites de ces deux calibres comprennent des tolérances minima et maxima fixées comme suit, suivant le diamètre des tubes :

Jusque 45 mm. inclus	— 0,2 mm.	+ 0,3 mm.	Ovale maximum.	0,4 mm.
De 45 mm. exclu à 80 mm. inclus.	— 0,3 —	+ 0,5 —		0,7 —
De 80 — 100 —	— 0,5 —	+ 1,0 —		1,0 —

Les épaisseurs seront régulières sur tout le pourtour dans les limites de tolérance ci-après :

Tubes en fer ou en acier doux soudés.	Épaisseurs.	de 2 mm. exclu à 3 mm. inclus.	— 0,2 mm.	+ 0,5 mm.
		de 3 mm. exclu et au-dessus. .	— 0,3 —	+ 0,7 —

Tubes en fer, acier doux ou laiton, étirés : rien en moins, + 0,2 mm.

Il est admis sur les longueurs fixées à la commande ou au marché une tolérance de 6 mm. en plus ou de 2 mm. en moins.

Les bouts seront parfaitement coupés d'équerre, bien ébarbés et sains. Ils seront recuits au charbon de bois

Les vérifications et essais ont lieu dans les proportions suivantes :

Un sur cinq : Épreuve à la pression :

Un sur deux cents : Essais d'aplatissement, de retournement, de rabattement de collerette, d'élargissement, de cintrage, de pliage et de trempe.

Pour l'essai à la pression, la pression à appliquer sera :

Pour les tubes en fer ou en acier doux : de 25 kg. par centimètre carré.

Cette pression sera maintenue pendant une minute, sans que le tube présente aucune trace d'altération ni de suintement.

Tous les tubes sans exception doivent être, avant présentation, essayés individuellement à la pression par l'usine.

Pour l'essai d'aplatissement, le morceau de tube sera préalablement recuit au charbon de bois ; posé sur une surface plane et rigide, il sera aplati au pilon.

Aucune paille, fente, gerçure, crique ou autre défaut ne doivent se manifester avant que les réductions suivantes sur les diamètres aient été obtenues, savoir :

88 0/0 pour les tubes en fer soudés ;

96 0/0 pour les tubes en acier doux soudés ou étirés.

Pour l'essai de retournement, un morceau de 0,100 m. préalablement recuit, sera scié suivant une génératrice et retourné de façon à former un morceau de tube dont la surface intérieure sera la surface extérieure primitive.

Cet essai doit avoir lieu sans paille, crique, fente ni gerçure, pour tous les tubes quelconques.

Pour l'essai de rabattement à froid d'une collerette, le morceau de tube, préalablement recuit, doit pouvoir fournir, pour le fer ou l'acier doux soudé ou étiré, une collerette régulière, ayant pour diamètre extérieur celui du tube augmenté de quatre fois son épaisseur, rabattue à froid, à angle droit, sur un congé intérieur de raccordement égal à une fois l'épaisseur du tube.

Pour l'essai d'élargissement, à froid, un bout de tube de 200 mm., posé debout sur une masse métallique et solidement maintenu, sera élargi par l'introduction d'un mandrin gradué, qu'on enfoncera jusqu'à ce que le diamètre intérieur soit augmenté, sans criques, gerçures ou autres défauts, de :

4 0/0 pour les tubes en fer soudés ;

8 0/0 pour les tubes en acier doux.

A froid, un bout de tube, préalablement recuit et rempli de résine, devra pouvoir se cintrer, sans criques ni pailles, jusqu'à ce que les extrémités soient réunies par une partie courbée régulièrement, suivant un tore ayant pour diamètre intérieur cinq fois le diamètre extérieur du tube pour tous les types.

Pour l'essai de pliage, sur les tubes en fer ou en acier doux, à chaud, un bout de tube préalablement recuit, rempli de sable réfractaire et convenablement chauffé, doit pouvoir se plier sans criques ni pailles, jusqu'à ce que le rayon de courbure intérieure soit de 6/10 du diamètre extérieur du tube.

Sur les tubes en acier doux, un des morceaux d'essai ci-dessus, chauffé au rouge cerise avancé et trempé dans l'eau à la température maximum de 20°, doit pouvoir se laisser ensuite parfaitement attaquer à la lime demi-douce.

Chemins de fer de l'Ouest. — Les tubes devront avoir une épaisseur uniforme sur toute leur longueur et sur toute leur circonférence.

Ils devront être parfaitement dressés ; les ondulations locales qu'ils pourraient présenter ne devront pas avoir une flèche de plus de 3 mm. mesurée sur 1 m. de longueurde la partie considérée ; la flèche totale, mesurée sur la longueur du tube, ne devra pas dépasser 12 mm.

En outre, il sera accordé sur le diamètre extérieur les tolérances ci-après :

2/10 de millimètre en moins ou 3/10 de millimètre en plus pour les tubes ayant un diamètre inférieur à 45 mm., et 3/10 de millimètre en moins ou 5/10 de millimètre en plus, pour les tubes ayant un diamètre supérieur à 45 mm.

Les tubes ne devront présenter ni à l'intérieur, ni à l'extérieur, aucune rayure, piqûre, paille, crique, fissure ou aucun autre défaut.

Tous les tubes seront soumis à une pression hydraulique intérieure de 25 kg. par centimètre carré. Ils devront subir cette épreuve sans qu'il se déclare ni suintement, ni trace d'altération.

Un tube par lot et au moins un tube par lot de cent tubes sera soumis aux essais suivants, qui devront tous être faits à froid :

a) Le tube sera cintré suivant un cercle dont le rayon intérieur sera égal au double du diamètre du tube ;

b) Une collerette de 12 à 15 mm. de largeur sera rabattue à angle droit à l'une de ses extrémités;

c) Un bout de tube d'au moins 100 mm., prélevé en un point quelconque de la longueur sera sectionné suivant une génératrice, puis développé et cintré en sens inverse de la courbure primitive du tube ;

d) Le tube sera évasé au mandrin mécanique jusqu'à ce que son diamètre intérieur soit augmenté de 6 0/0 de sa valeur primitive.

Le tube devra pouvoir supporter toutes les épreuves ci-dessus sans qu'il se manifeste aucune crique ni gerçure ;

e) Pour les tubes en acier spécialement, indépendamment des essais définis aux paragraphes *a*, *b*, *c*, *d* ci-dessus, une éprouvette de 200 mm. de longueur utile, découpée à froid dans le tube, sera essayée à la traction ; la charge de rupture sera d'au moins 42 kg. par millimètre carré de section et l'allongement d'au moins 18 0/0, mesuré dans les 100 mm. comprenant le point de rupture. Toutefois, il sera admis une tolérance de 3 kg. en moins sur la charge de rupture, à la condition que chaque kilogramme en moins de 42 kg. soit compensé respectivement par 1 0/0 d'allongement en plus de 18 0/0. De même, il sera admis une tolérance de 3 0/0 en moins sur l'allongement, à la condition que chaque cen-

tième en moins de 18 0/0 soit compensé respectivement par 1 kg. de charge de rupture en plus de 42 kg.

La même éprouvette, chauffée au rouge sombre (visible dans l'atelier) et plongée dans l'eau ayant une température de 10 à 20° C., ne devra pas prendre la trempe et devra pouvoir être attaquée par une lime douce.

Chemins de fer de Paris a Lyon et a la Méditerranée. — Les tuyaux pour tubes à fumée sont fabriqués avec des bandes en métal fondu obtenues par les procédés Bessemer ou Siemens-Martin ; ils sont soudés par recouvrement.

Les bandes en métal fondu, dont les bords longitudinaux ont été préalablement chanfreinés, sont chauffées à la température convenable et passées dans une filière qui les cintre et juxtapose les bords chanfreinés en les ramenant l'un sur l'autre.

Les tuyaux ainsi ébauchés sont chauffés de nouveau et passés dans un laminoir spécial : les bords chanfreinés se soudent en raison de la pression qu'ils subissent au passage entre les cylindres du laminoir et une olive qui est maintenue fixe, à l'intérieur du tuyau, par le travers des cylindres.

Les tuyaux sont ensuite dressés et sciés à longueur, puis on en recuit les deux bouts au charbon de bois. Ils doivent avoir des surfaces parfaitement nettes ; ils ne doivent présenter ni à l'intérieur ni à l'extérieur, aucune paille, crique, fissure ou autre défauts ; ils doivent être éboutés carrément, et les éboutements doivent être bien ébarbés.

Les tuyaux doivent avoir aussi exactement que possible les dimensions indiquées par la commande ; l'épaisseur doit être bien régulière sur tout leur pourtour et sur toute leur longueur. Il est accordé sur le diamètre, l'épaisseur et le poids au mètre courant les tolérances résultant du tableau ci-après.

Les tuyaux sont refusés si leurs dimensions ou leurs poids ne sont pas compris entre

DIAMÈTRES EXTÉRIEURS					ÉPAISSEURS					POIDS PAR MÈTRE COURANT			
Dimensions normales au corps.	LIMITES ADMISES au corps.		LIMITES ADMISES au bout renflé		Dimensions normales au corps.	LIMITES ADMISES au corps.		LIMITES ADMISES au bout renflé		Poids normaux.	Poids en dehors desquels les tuyaux seront refusés individuellement.		Poids moyens au-dessus desquels les excédents ne sont pas payés.
	Minimums.	Maximums.	Minimums.	Maximums.		Minimums.	Maximums.	Minimums.	Maximums.		Minimums.	Maximums.	
Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Mill.	Kil.	Kil.	Kil.	Kil.
40	39,7	40,3	42,2	43,0	1,8	1,6	2,2	1,4	1,9	1,685	1,663	1,884	1,861
45	44,7	45,3	47,2	48,0	2,0	1,8	2,4	1,5	2,1	2,107	2,082	2,332	2,306
46	45,7	46,3	48,2	49,0	2,2	2,0	2,6	1,7	2,3	2,361	2,336	2,589	2,563
48	47,6	48,4	50,0	51,0	2,2	2,0	2,6	1,7	2,3	2,469	2,442	2,708	2,681
50	49,6	50,4	52,0	53,0	2,2	2,0	2,6	1,7	2,3	2,577	2,549	2,827	2,798
55	54,6	55,4	57,0	58,0	2,2	2,0	2,6	1,7	2,3	2,846	2,815	3,124	3,092
60	59,6	60,4	62,0	63,0	2,5	2,3	2,9	2,0	2,6	3,522	3.455	3,824	3,790
65	64,6	65,4	67,0	68,0	2,5	2,0	2,5 et à la soudure. 2,8	après alésage 1,8	2,5	5,700	4,960	6,400	6,200
70	69,5	70,5	71,8	73,0	3,0	2,7	3.3	2,4	3,0	4,925	4,650	5,199	5,159
75	74,5	75,5	76,8	78,0	3,0	2,7	3,3	2,4	3,0	5,293	4,996	5,588	5,545
80	79,5	80,5	81.8	83,0	3,0	2,7	3,3	2,4	3,0	5,661	5,342	5,977	5,931

les limites minima et maxima indiquées par ce tableau ; en outre, si leur poids dépasse le poids moyen inscrit audit tableau, l'excédent n'est pas payé au fournisseur.

La ténacité et la malléabilité du métal à froid et à chaud sont constatées par des épreuves faites sur les tuyaux terminés.

Pour constater la ténacité du métal à froid, les tuyaux sont tous éprouvés à la presse hydraulique ; ils doivent résister à une pression de 20 kg. par centimètre carré, maintenue peudant une minute au moins, sans qu'il se manifeste, pendant ce temps, ni suintement, ni aucune trace quelconque d'altération. Tous ceux qui ne satisfont pas à cette épreuve sont refusés.

Des essais de malléabilité à froid et à chaud sont faits sur un certain nombre de tuyaux (1 pour 50 au minimum) qui doivent subir les épreuves suivantes :

1° Un bout de tuyau recuit doit supporter le rabattement à froid d'une collerette à angle droit ayant pour largeur quatre fois l'épaisseur du métal, sans qu'il se manifeste ni fente, ni éclat.

La surface plane supérieure de la collerette est raccordée avec la surface cylindrique intérieure du tuyau par un congé ayant pour rayon deux fois l'épaisseur du métal. La largeur de la collerette est mesurée entre son arête extérieure et le prolongement des génératrices intérieures de la partie du tuyau restée cylindrique.

Ce rabattement doit être obtenu en deux opérations seulement, au moyen d'un balancier ou de toute autre manière analogue. Le tuyau à essayer étant introduit dans un mandrin en fonte, on évase dans une première opération le tuyau à sa partie supérieure en y introduisant, d'un coup de balancier, un mandrin présentant un cône à 45°.

Dans une deuxième opération, on rabat d'un coup de balancier la collerette au moyen d'un mandrin cylindrique à chapeau.

2° Un bout de tuyau recuit doit pouvoir être agrandi à froid au moyen d'un mandrin conique jusqu'à ce que son diamètre extérieur ait augmenté de 6 0/0 de sa valeur primitive.

3° Deux bouts de 100 mm. de longueur, coupés aux deux extrémités d'un tuyau, sont recuits, puis sciés suivant une génératrice et retournés à froid pour former deux morceaux de tuyau dont la surface intérieure est la surface extérieure primitive. Ce retournement ne doit révéler aucune paille ni gerçure.

Un bout de tuyau convenablement chauffé doit supporter le rabattement d'une collerette à angle droit ayant pour largeur sept fois l'épaisseur du métal, sans qu'il se manifeste ni crique, ni gerçure.

La surface plane supérieure de la collerette est raccordée avec la surface cylindrique intérieure du tuyau par un congé ayant pour rayon deux fois l'épaisseur du métal.

La largeur de la collerette est mesurée entre son arête extérieure et le prolongement des génératrices intérieures de la partie du tuyau restée cylindrique.

Chemin de fer de Paris a Orléans. — Les tubes seront en fer au bois de première qualité ou en acier doux, suivant les indications de la commande ; dans ce dernier cas, le métal servant à la fabrication des tubes proviendra exclusivement de lingots d'acier obtenus dans des fours genre *Martin-Siemens*.

Ils seront recuits aux deux extrémités.

Leurs surfaces intérieures et extérieures devront être très nettes, sans pailles, criques, dessoudures ou autres défauts.

Lors de la réception, chacun des tubes sera vérifié minutieusement et devra supporter une pression intérieure hydraulique de 25 kg. par centimètre carré sans criques, suintements ou traces de déformation.

Sur chaque centaine de tubes du lot présenté, il en sera pris un au hasard, dans lequel on coupera quatre tronçons de 100 mm. de longueur pour leur faire subir à froid, après recuit, les quatre essais suivants :

Premier essai. — Une collerette de 6 mm. de largeur pour les tubes en fer et de 12 mm.

pour ceux en acier devra être rabattue horizontalement sans qu'il se produise ni fente ni éclat. Pour les tubes en fer, la collerette sera faite à la main et à petits coups de marteau; pour les tubes en acier, elle sera obtenue en deux opérations seulement faites à grands coups de marteau : la première avec un mandrin conique et la seconde avec un mandrin cylindrique à tête raccordée au corps par un congé de 3 mm. de rayon.

Deuxième essai. — Un emboutissage égal à une fois et un tiers le diamètre extérieur primitif pour une longueur égale à ce diamètre devra être obtenu sans criques, en recuisant plusieurs fois s'il est nécessaire. Pour les tubes en fer, l'emboutissage sera fait à la main et au marteau, et pour les tubes en acier il sera fait avec un mandrin conique.

Troisième essai. — Un aplatissement sous le pilon devra être fait sans qu'il se manifeste ni criques ni gerçures.

Quatrième essai. — Un tronçon scié suivant une génératrice devra pouvoir être retourné sans pailles ni gerçures jusqu'à présenter un bout de tube dont la surface intérieure soit la surface extérieure primitive.

Chemins de fer de l'Etat français. — Il sera fait une vérification minutieuse de chacun des tubes livrés et tous devront satisfaire aux conditions suivantes :

1° Avoir les dimensions rigoureuses des dessins;

2° Être parfaitement ronds et présenter une épaisseur constante dans chaque section;

3° Résister à une pression intérieure de 20 kg. par centimètre carré à la presse hydraulique sans qu'il se produise aucun suintement sur le corps du tube. Si le nombre de tubes ne satisfaisant pas à cette condition dépasse 2 0/0 la livraison entière sera refusée;

4° Satisfaire aux épreuves mécaniques suivantes qui seront effectuées à raison d'un tube pris au hasard par 100 tubes un nombre de tubes inférieur à 100 comptant comme 100.

Première épreuve. — Deux bouts de 100 mm. coupés aux deux extrémités du tube seront recuits, puis sciés suivant une génératrice et retournés jusqu'à présenter deux bouts de tubes dont la surface intérieure soit la surface extérieure primitive. Ce retournement ne devra révéler aucune paille, ni gerçure, ni dessoudure.

Deuxième épreuve. — Les ailettes d'un bout ayant été préalablement enlevées, ce bout recuit devra supporter le rabattage à froid d'une collerette de 15 mm. de bord, sans qu'il se déclare ni fente, ni dessoudure.

Troisième épreuve. — Un bout de 100 mm. de longueur doit pouvoir s'écraser sous le pilon suivant son axe, sans qu'il se manifeste aucune crique.

Toute livraison de tubes ne satisfaisant pas à ces conditions sera refusée.

Chemins de fer du Midi. — L'épaisseur des tubes sera de 0,0025 m. pour les tubes des diamètres extérieurs inférieurs à 60 mm., et de 3 mm. pour les tubes des diamètres extérieurs de 60 mm. et au-dessus.

Cette épaisseur sera très régulière sur tout le pourtour du tube.

Il sera accordé, sur cette épaisseur, 2/10 de millimètre en plus; il ne sera pas accordé de tolérance en moins.

Il sera accordé sur la longueur totale du tube une tolérance de 5 mm. en moins et de 20 mm. en plus.

Le diamètre extérieur devra être conforme à la demande et régulier sur toute la longueur des tubes; il sera accordé 5/10 de millimètre de tolérance en plus ou en moins sur ce diamètre. Les extrémités des tubes seront affranchies carrément.

Les tubes seront fabriqués en tôle de fer cintrée et soudée par recouvrement.

Les surfaces devront être parfaitement nettes, sans pailles, criques, dessoudures ou autres défauts.

Les tubes devront être parfaitement dressés.

Chaque tube sera soumis pendant une minute à une pression hydraulique intérieure de 25 kg. par centimètre carré. Ceux qui présenteront des traces de déformation, de crique ou de suintement seront refusés.

Les tubes ayant satisfait à cet essai préalable seront divisés, autant que possible, en lots de 51 tubes.

Sur chaque lot, on prélève un tube d'essai sur lequel on découpe deux tronçons de 100 mm. de longueur.

Les tronçons recuits au rouge cerise clair et refroidis directement à l'air seront soumis à froid aux épreuves suivantes :

1° Rabattement sur le premier tronçon d'une collerette régulière, ayant comme diamètre extérieur le diamètre extérieur du tube, augmenté de 100 mm.

Cette collerette sera rabattue à angle droit, par rapport à la surface intérieure du tube avec laquelle elle sera raccordée par un congé de 5 mm. de rayon.

Le rabattement de la collerette sera effectué au moyen de deux mandrins, le premier rabattant à 45° et le second rabattant d'équerre ;

2° Redressement du second tronçon, coupé suivant une génératrice, et enroulement en sens contraire de l'enroulement primitif jusqu'à ce que les bords sciés se trouvent de nouveau en contact.

L'essai sera effectué au marteau.

Le redressement se fera sur l'enclume et l'enroulement, en sens contraire, se fera à l'étau ;

3° Un certain nombre de tubes, choisis dans chaque lot, subissent un essai au mandrinage effectué de la manière suivante :

L'une des extrémités des tubes prélevés pour cet essai sera recuite, comme il est dit plus haut, puis mandrinée à froid avec un mandrin cône enfoncé au marteau, jusqu'à augmentation de 8 0/0 du diamètre intérieur sur une longueur de 0,040 m.

Great Western Railway. — Les tubes sont en fer ou en acier. Pour les tubes en fer, le fournisseur garantit par écrit qu'ils sont fabriqués avec la tôle supérieure de Staffordshire (marques Earl Dudley ou Barrow) ou avec une tôle de qualité égale. Les tubes en acier sont fabriqués en acier doux Bessemer ou Siemens de qualité acceptée.

Les tubes seront parfaitement nets et bien finis, les bouts coupés nettement et carrément et la surface exempte de défauts.

Ils auront exactement les dimensions indiquées par la commande ; sauf prescription contraire, leur épaisseur sera partout du numéro 12 B. W. G. (2,75 mm.) ; le tableau suivant en donne les poids :

Diamètre extérieur.	Poids par mètre.
57 mm.	3,58 kg. à 3,80 kg.
51 —	3,15 — 3,37 —
47,5 —	2,94 — 3,16 —
44,5 —	2,72 — 2,94 —
41 —	2,51 — 2,73 —
38 —	2,30 — 2,53 —

Les tubes sont élargis de 1,6 mm. sur le diamètre à une extrémité et rétreints de 3,2 mm. à l'autre, lorsque la commande l'indique, sans augmentation de prix.

Chaque tube est bien recuit aux deux bouts.

Les tubes sont livrés propres et sans rouille à l'intérieur et à l'extérieur ; ils ne sont pas couverts de peinture ou autre enduit.

Chaque tube doit pouvoir supporter, sans fuites, une pression intérieure de 56 kg. et extérieure de 17,5 kg. par centimètre carré.

CHAPITRE III

DÉTAILS DE CONSTRUCTION DES CHAUDIÈRES

Différents types de boîtes à feu. — Foyer. — Enveloppe de boîte à feu. — Entretoises. — Consolidation du ciel de foyer. — Corps cylindrique. — Dôme. — Tubes. — Plaque tubulaire avant. — Boîte à fumée. — Cheminée. — Autoclaves et bouchons de lavage. — Attache de la chaudière sur le châssis.

189. Différents types de chaudières et de boîtes à feu. — Indépendamment de leurs proportions, les chaudières locomotives se partagent en plusieurs catégories, présentant d'ailleurs entre elles la plus grande analogie, suivant que leur boîte à feu est à berceau cylindrique ou à faces planes. Nous examinerons successivement ces deux types principaux de boîtes à feu. Les figures incorporées dans ce chapitre représentent de nombreux types de chaudières, de types tous récents.

Les boîtes à feu à *berceau cylindrique* se divisent elles-mêmes en deux classes : à la première appartiennent les boîtes à feu du type *Crampton*, et à la seconde les boîtes à feu *renflées*.

Dans la boîte à feu à berceau cylindrique dite du type Crampton (fig. 314 et 315) l'enveloppe du foyer est constituée par une tôle qui, dans la région placée au-dessus du plan diamétral horizontal de la chaudière, est cintrée suivant un cylindre ayant même axe que le corps cylindrique. La partie située au-dessous de ce plan est parallèle aux côtés du foyer et, dans la partie intermédiaire, se raccorde avec le cylindre supérieur par des arrondis de diamètre assez grand. Cette tôle d'enveloppe est placée à recouvrement, directement au-dessus de la virole arrière du corps cylindrique à laquelle elle est rattachée par une rangée de rivets simples ou doubles; à sa partie basse elle est rivée au cadre.

Dans la boîte à feu renflée (fig. 317 et 318), ou bien l'axe du berceau se confond avec celui du corps cylindrique et alors son rayon est plus grand, ou bien son rayon se trouve à peine supérieur à celui du corps cylindrique mais son axe est placé plus haut; dans ce dernier cas l'enveloppe du foyer est

donc excentrée. Le premier dispositif a été très employé autrefois ; il avait l'avantage de permettre de donner au foyer et aux lames d'eau une plus grande largeur mais, dans la suite, on a dû augmenter le diamètre du corps cylindrique tandis que le foyer avait atteint la limite que permettait l'écartement

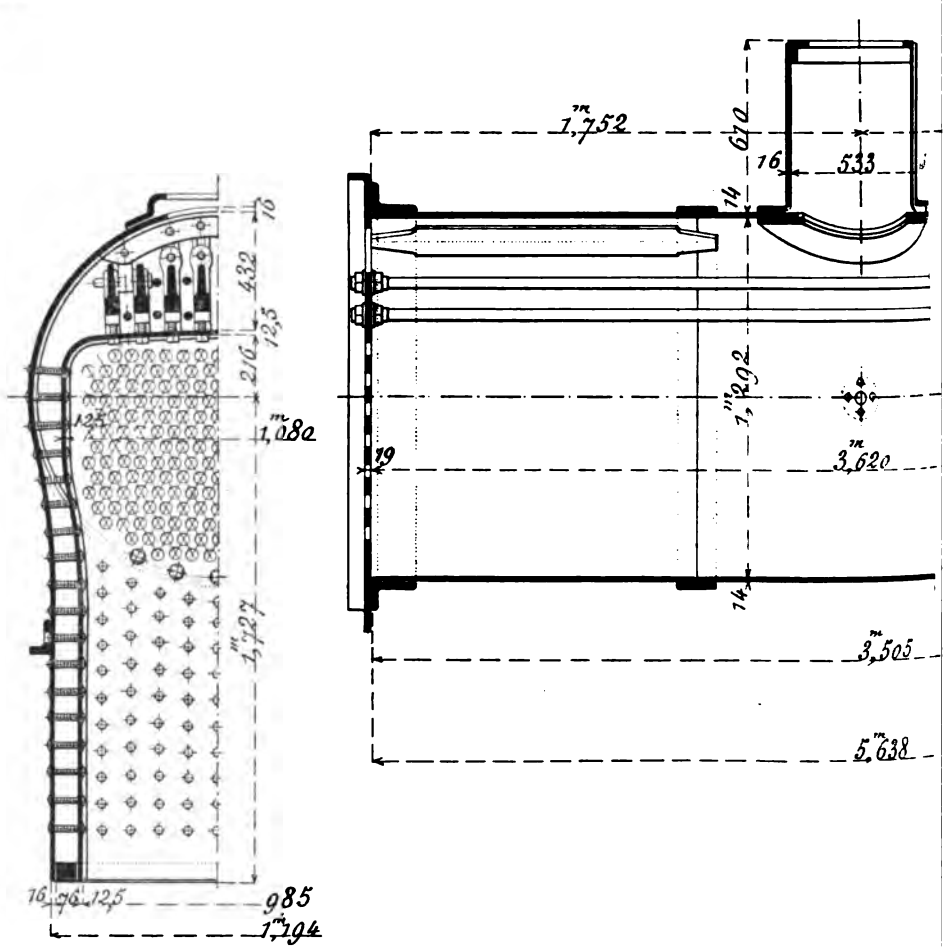


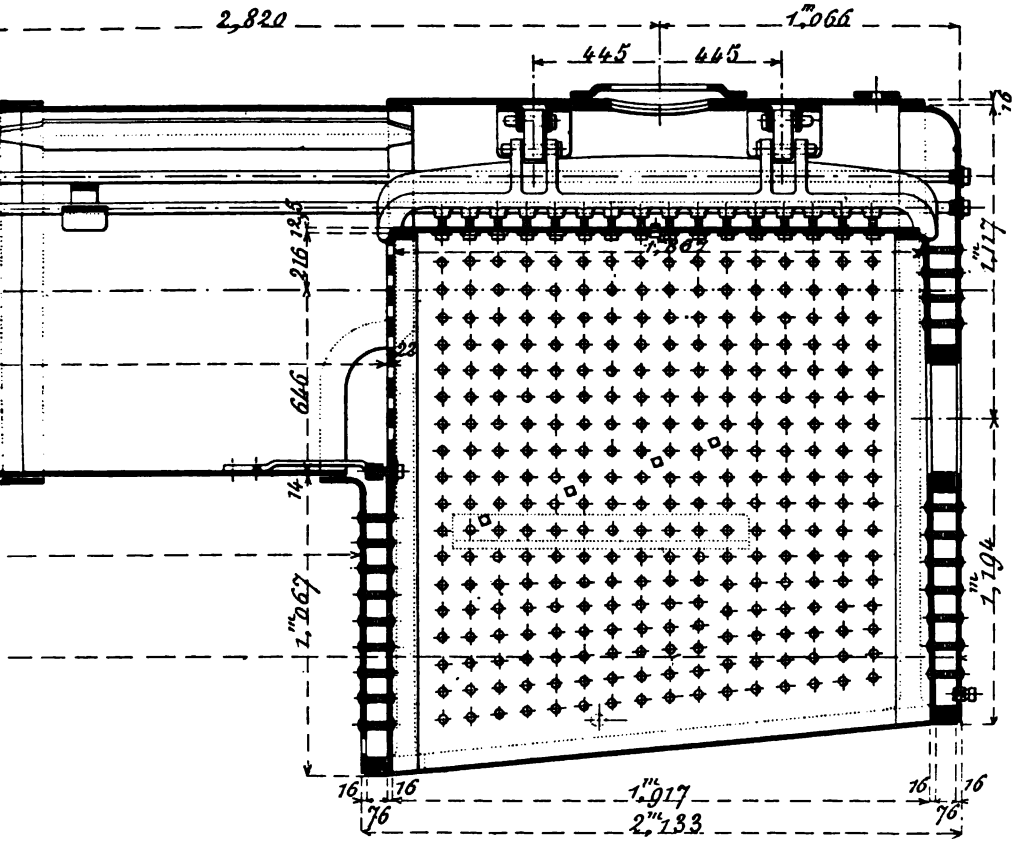
Fig. 314. — Type de chaudière à foyer Crampton ; locomotives à grande vitesse type

des bandages et il a fallu renoncer à donner à la boîte à feu une largeur notablement plus grande qu'au corps cylindrique et on s'est trouvé amené au second dispositif. Dans ce genre de boîte à feu, la génératrice supérieure de l'enveloppe du foyer se trouve placée à une plus grande distance au-dessus du ciel de foyer que dans le type Crampton.

Le berceau est réuni à la virole arrière du corps cylindrique par une tôle emboutie de forme assez compliquée sur laquelle elle est placée à recouvrement et qui, à part sa plus grande hauteur, quand le cadre est incliné, et l'ouverture circulaire à pince relevée qu'elle présente au milieu dans la partie

haute, servant à son attache sur le corps cylindrique, est semblable à la tôle formant la façade arrière.

Les Américains emploient beaucoup ce genre de foyer qui, jusque dans les dernières années, constituait leur type classique mais avec une variante importante. La tôle emboutie de l'avant dont nous venons de parler est alors remplacée par une virole conique, de section circulaire sur toute sa longueur,



395) du *North-Eastern Railway*, les plus puissantes actuellement en service en Angleterre.

mais dont la génératrice inférieure se trouve horizontale, tandis que la génératrice supérieure est inclinée vers l'avant. Les sections successives, en allant de l'arrière à l'avant, sont ainsi des cercles de diamètre décroissant mais tangents, à leur partie basse, au même plan horizontal. Cette disposition simple et peu coûteuse, qui évite les emboutis, a reçu aux États-Unis le nom de *wagon-top* (fig. 318 et 320). La virole de raccord est quelquefois située au milieu ou à l'avant du corps cylindrique, la virole arrière restant cylindrique et du même diamètre que le berceau (fig. 319 et 320).

La *Compagnie d'Orléans* a adopté, pour les foyers de quelques machines

une disposition intermédiaire entre les systèmes américain et européen. La boîte à feu est reliée au corps cylindrique par une virole de raccord tronconique, très courte (fig. 371).

Les foyers à faces planes, qui sont en très grande faveur aujourd'hui, sont

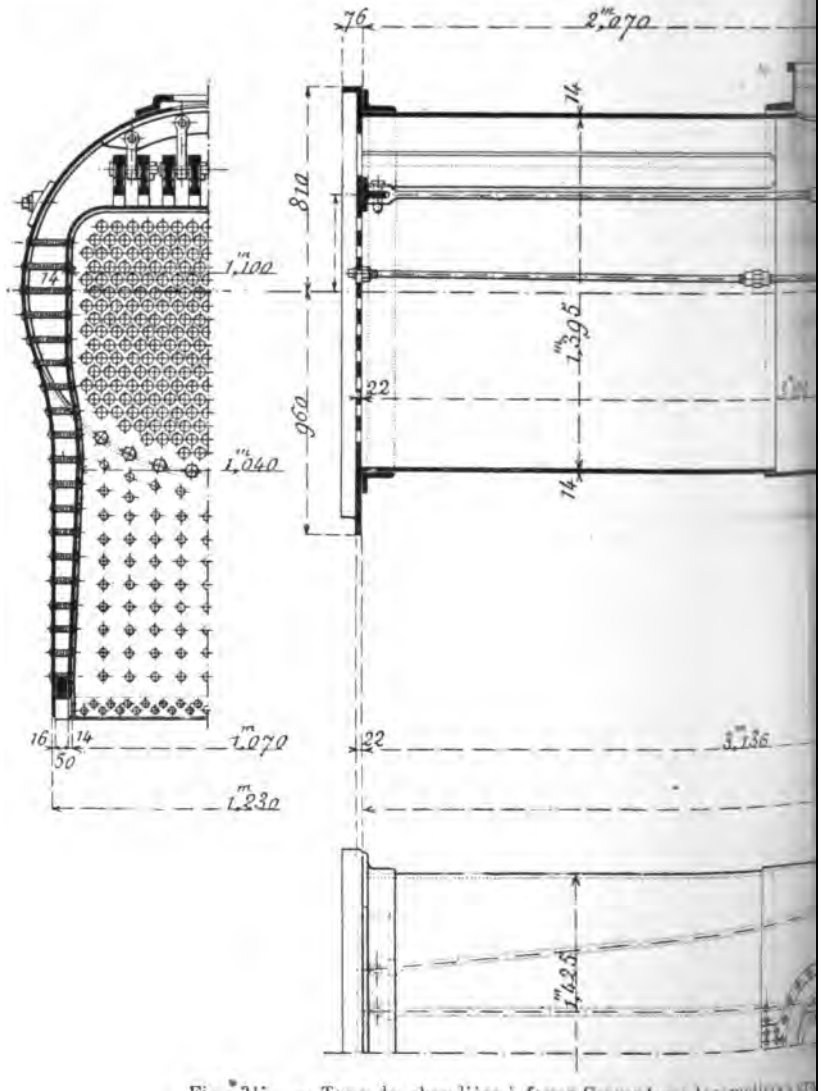
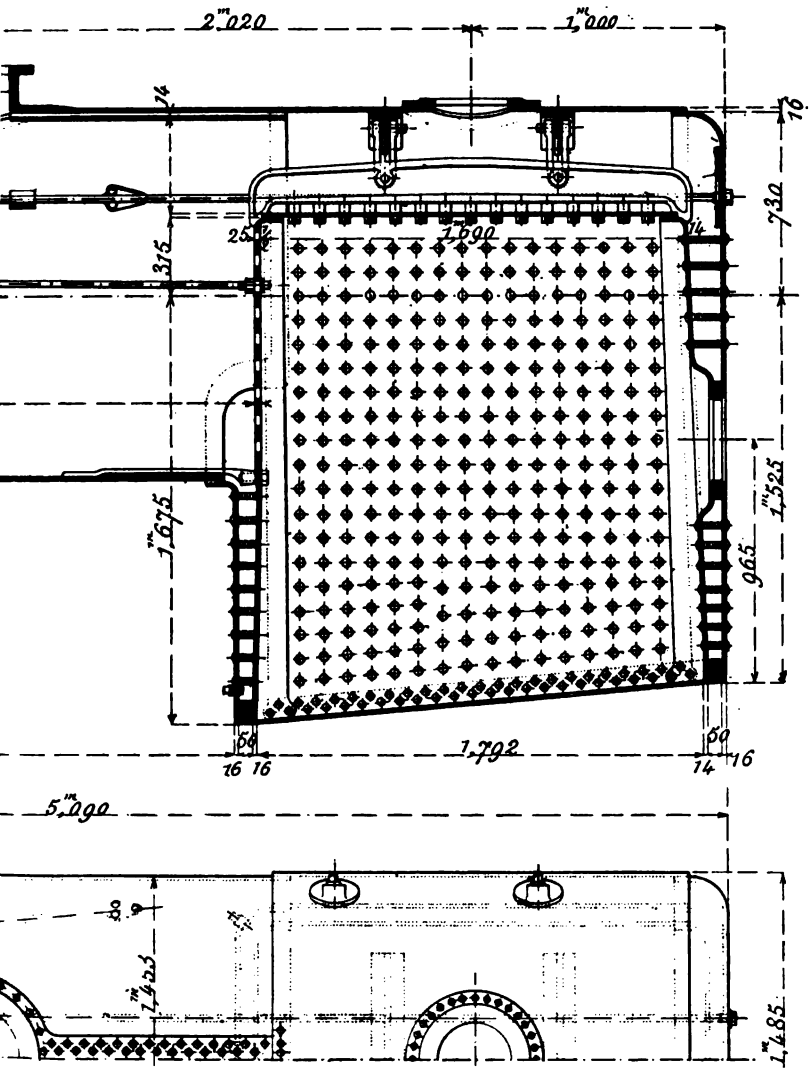


Fig. 315. — Type de chaudière à foyer Crampton ; locomotives

dérivés du type *Belpaire* (fig. 321 à 325). Dans cette disposition, la boîte à feu présente une section transversale à peu près semblable à celle du foyer. La partie supérieure est parallèle au ciel et les deux faces latérales le sont sensiblement aux parois du foyer. Ces parties sont raccordées par des arrondis de diamètre variable. Ce type de foyer a été adopté en vue de faciliter l'ar-

maturage du ciel par des tirants. Comme dans les autres systèmes de boîtes à feu, l'enveloppe est constituée, suivant les dimensions du foyer, par une seule tôle ou par plusieurs tôles (fig. 321, 323, 325). Pour augmenter la résistance propre de ce genre de boîte à feu, quelques constructeurs américains



sse du *Caledonian Railway* (type de 1896; *Dunalastair class*).

donnent au ciel et à la partie supérieure du berceau une forme légèrement cintrée, comme on le voit figure 308. En principe, la boîte à feu Belpaire ne se distingue extérieurement du foyer Crampton que par le rayon beaucoup plus grand de la partie supérieure de l'enveloppe. Dans le type le plus répandu, ce rayon est infini.

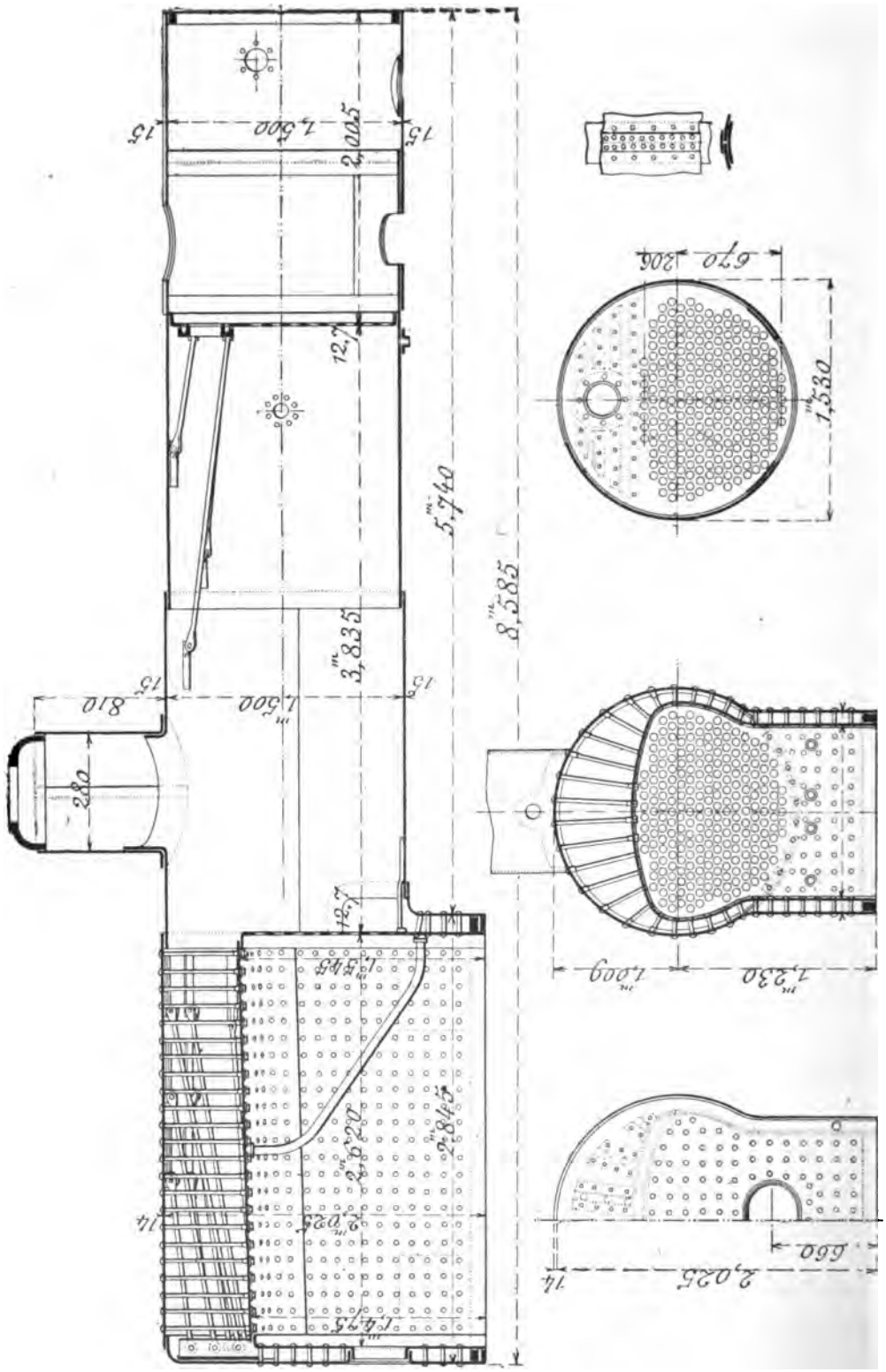


Fig. 316. — Chaudière de locomotive américaine, à boîte à feu Crampton, construite par les *Schenectady Locomotive Works.*

La boîte à feu de ce type fait, à la partie haute, une saillie plus ou moins grande sur la génératrice supérieure de l'enveloppe. Dans certaines chaudières, cette saillie n'est pas supérieure à l'épaisseur des tôles qui se superposent (fig. 324 et 325) ; dans d'autres, le berceau est disposé comme dans les foyers renflés et se trouve raccordé au corps cylindrique par une tôle emboutie sur tout son pourtour qui embrasse la virole arrière (fig. 321 et 322). D'ailleurs, même si la boîte à feu ne forme pas saillie, il est nécessaire de disposer à l'avant une tôle emboutie servant à raccorder les pinces rectilignes de l'enveloppe à la tonne et constituant les coins du foyer à l'avant.

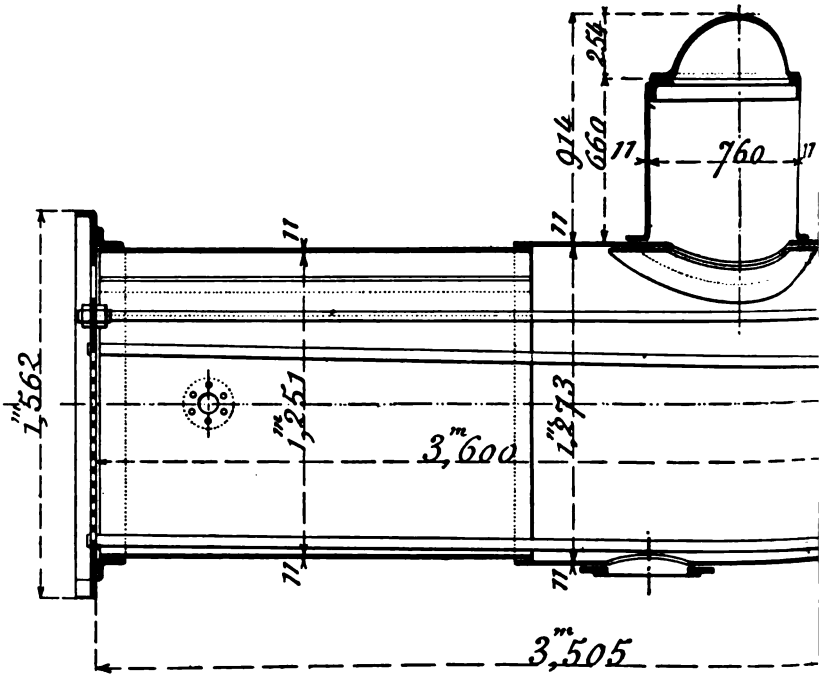
Les Américains ont, dans quelques machines, combiné l'emploi du foyer Belpaire et de la boîte à feu renflée dite à *wagon-top*.

De ces trois genres de boîte à feu, c'est le type Crampton qui présente la plus grande facilité de construction et la plus grande simplicité; sa forme cylindrique, avantage qu'elle partage d'ailleurs avec la boîte renflée, lui permet de résister par elle-même à la pression intérieure sans qu'il faille employer de tirants, tandis que l'enveloppe à faces planes n'a pas de résistance propre et doit être armaturée; elle est cependant préférée par beaucoup de constructeurs en raison des facilités qu'elle donne pour relier le ciel du foyer au berceau par entretoises normales aux deux parois.

Les boîtes à feu renflées ont l'avantage de permettre de relever un peu le ciel du foyer et de placer quelques tubes de plus dans le corps cylindrique. Il n'est pas en effet nécessaire que la hauteur de la chambre de vapeur soit aussi considérable, au-dessus du faisceau tubulaire que par le travers du foyer, l'ébullition y étant beaucoup moins vive. Si on ne relève pas le ciel, elles donnent une petite augmentation du volume de vapeur, mais c'est là un faible avantage. D'autre part, ces boîtes à feu sont lourdes et un peu plus coûteuses que celles du type Crampton. On les emploie surtout quand on a besoin de poids sur l'arrière pour assurer la répartition, mais il vaut mieux employer un lest en fonte peu dispendieux que d'opérer le balancement de la machine au moyen d'une addition de poids coûteuse.

Autant que possible, on dispose le foyer en vue de le mettre en place à l'intérieur de la boîte à feu et de le *descendre* par le bas, en le transportant verticalement, parallèlement à lui-même (fig. 314, 315, 321, 323). La largeur maximum extérieure du foyer ne doit pas alors être supérieure à la largeur intérieure de la boîte à feu à son assemblage sur le cadre. Cette disposition ne peut toujours être adoptée particulièrement quand le corps cylindrique a un très grand diamètre et que le foyer descend, comme c'est presque toujours le cas, entre les longerons (fig. 316, 318, 319). On doit alors confectionner en trois pièces la tôle du berceau, la tôle supérieure, symétrique par rapport au plan vertical médian, étant de largeur suffisante pour permettre, après démontage, le passage du foyer. Parfois on préfère retirer le

foyer par l'arrière en démontant la façade de la boîte à feu. Ces deux disposi-



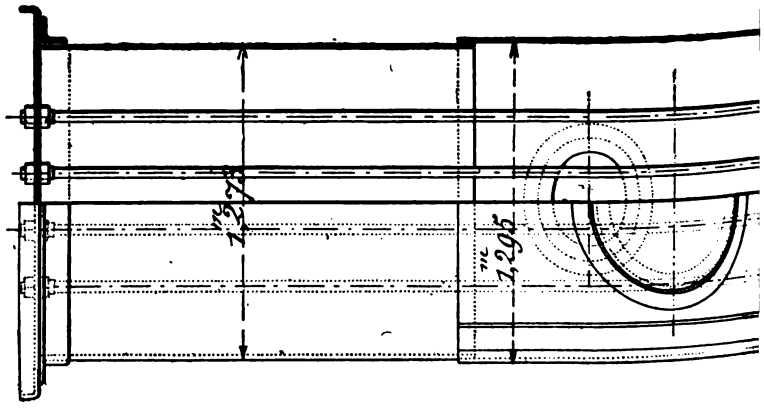
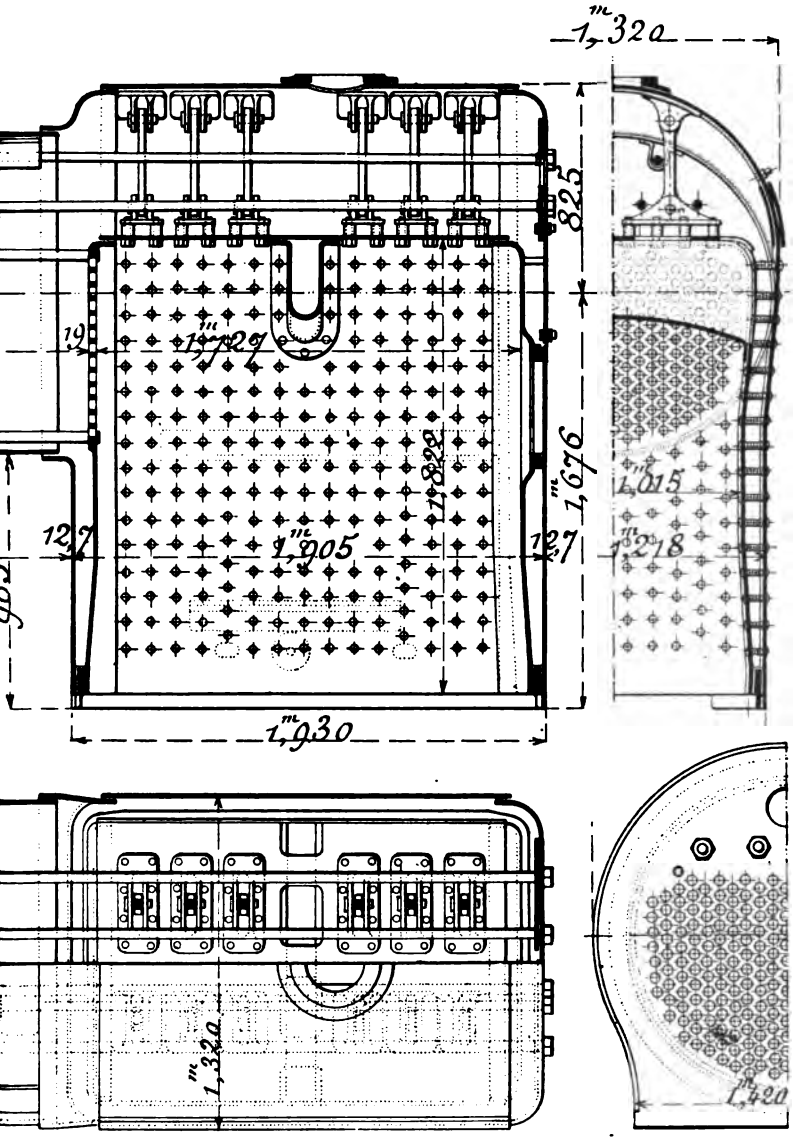


Fig. 317. — Type de chaudière à foyer renflé ; locomotives à gran

tions ont l'inconvénient de nécessiter le dérivetage d'une des tôles de la boîte à feu pour le démontage du foyer qui est ainsi plus long et plus coûteux;

en outre, quand les tôles sont en acier, l'opération du dérivetage risque fort de créer des fissures autour des trous obligeant à mettre les tôles au rebut.

Ces principes sommaires une fois posés, nous allons examiner avec plus



itesse, à roues libres (type 1893), du *Great Western Railway*.

de détails le mode de construction des boîtes à feu, surtout en ce qui concerne la liaison de l'enveloppe au foyer et la consolidation du ciel.

190. Foyer. — Le foyer se compose ordinairement de trois plaques deux fois repliées, dont l'une constitue les parois latérales et le dessus ou *ciel;* une autre

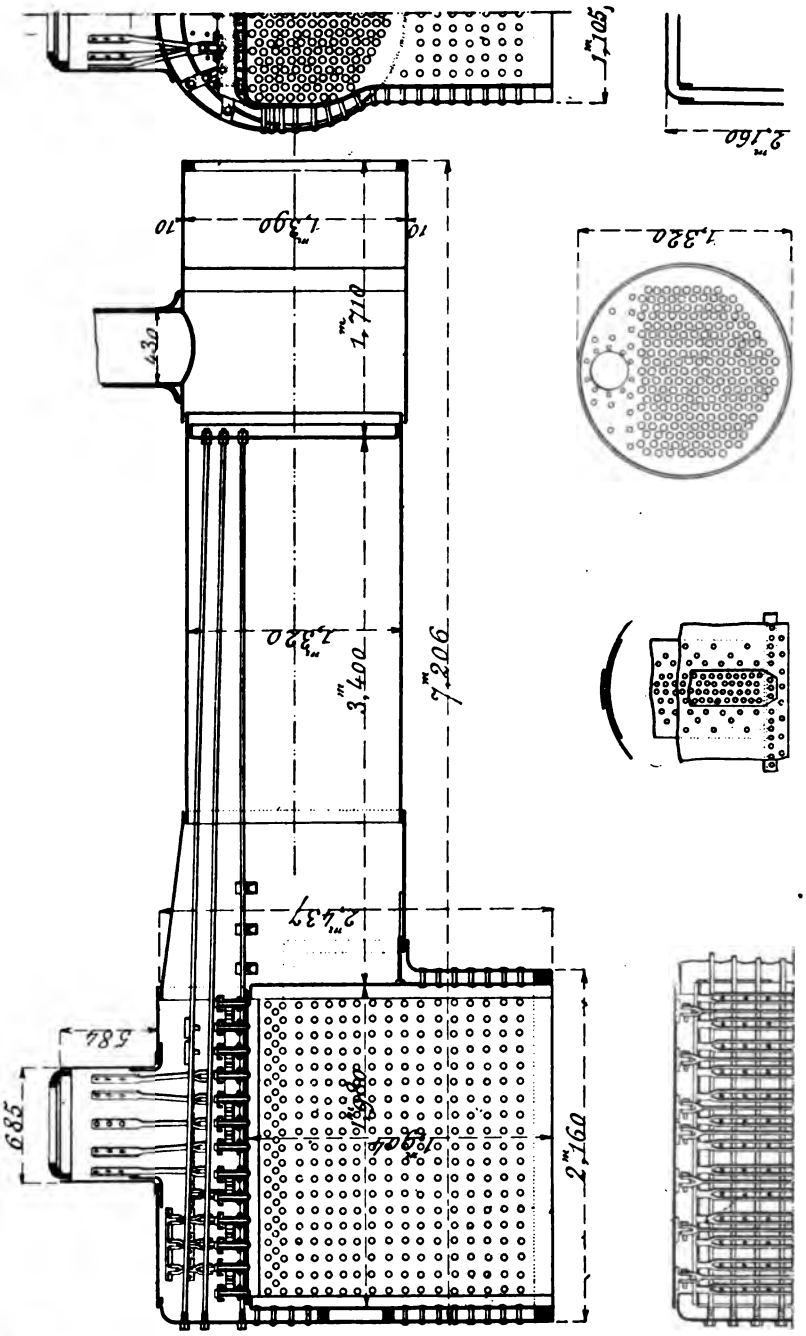


Fig. 318. — Chaudière de locomotive américaine, du type classique à foyer profond et *wagon-top*.

la face arrière, percée d'une ouverture pour la porte, l'autre enfin la plaque tubulaire et la face avant (fig. 314 et suiv.). Ces plaques, dans les machines

construites en Europe, sont en cuivre, à quelques rares exceptions près, nous

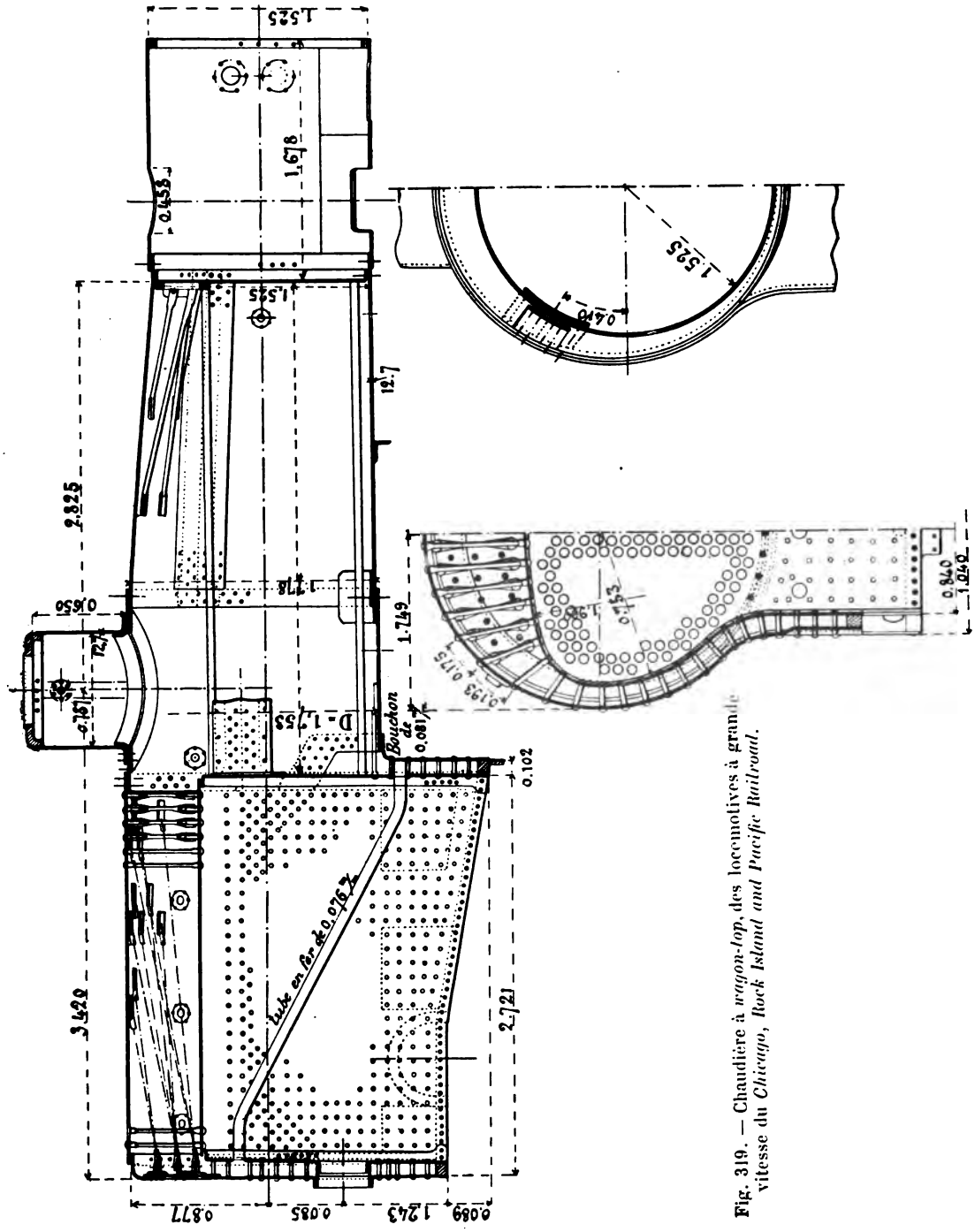


Fig. 319. — Chaudière à *wagon-top*, des locomotives à grande vitesse du *Chicago, Rock Island and Pacific Railroad.*

l'avons vu, tandis qu'elles sont en acier dans toutes les locomotives américaines.

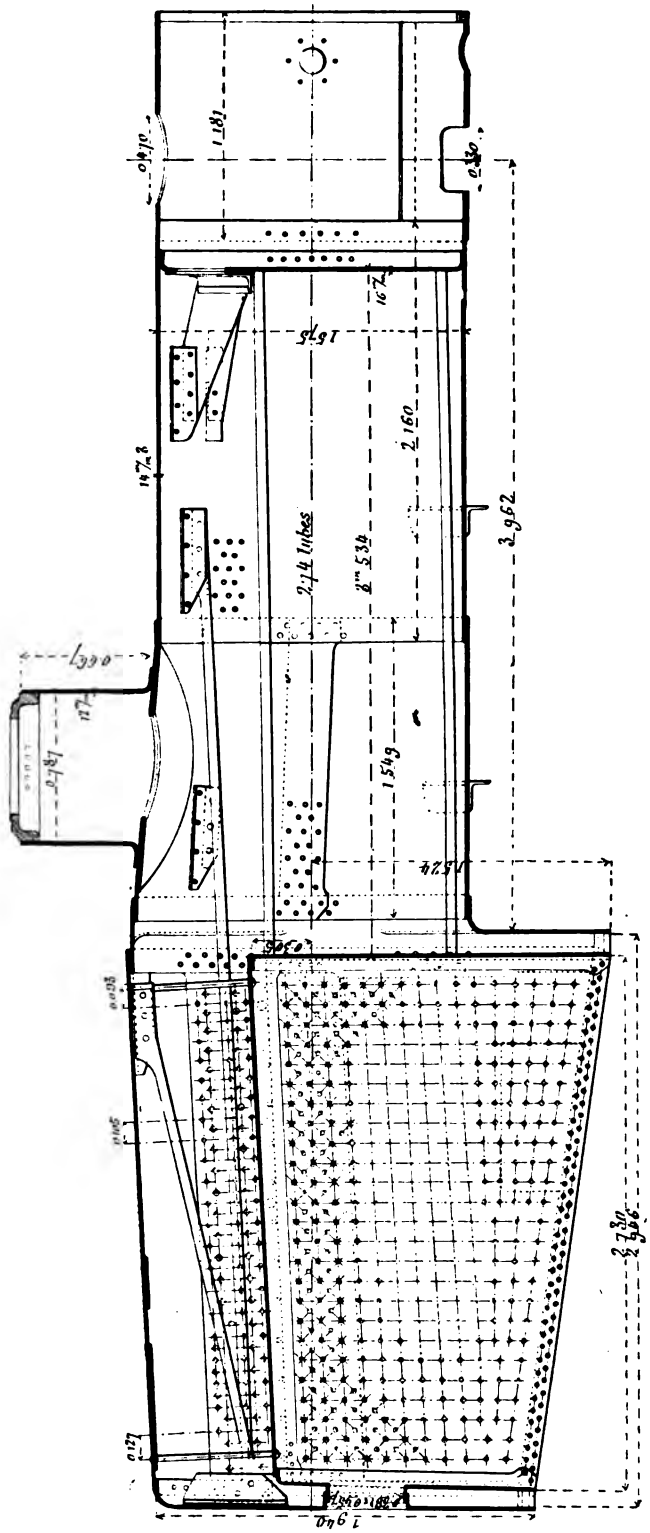


Fig. 320. — Chaudière à *wagon-top*, des locomotives à grande vitesse (type 1896) de l'*Illinois Central Railroad*.

Le ciel du foyer est généralement horizontal. Parfois cependant on l'incline légèrement sur l'arrière de manière à augmenter la hauteur de l'eau qui le recouvre vers le coup de feu (quand il y a une voûte en briques) et surtout pour empêcher, quand la machine descend une rampe fortement inclinée, que, si le niveau est un peu bas, le ciel ne vienne à se découvrir sur l'arrière.

Les plaques avant et arrière sont reliées au ciel, suivant tout leur pourtour, par deux pinces relevées tournées vers l'intérieur et comportant une rangée de rivets. Ces rivets sont souvent en cuivre, posés à froid ou à chaud à une température modérée. Pour diminuer leur diamètre, beaucoup de Compagnies mettent des rivets en fer.

La *Compagnie de l'Ouest* emploie des rivets en cuivre posés à chaud; l'*Orléans* emploie des rivets en cuivre posés à froid après recuit, sauf pour l'assemblage avec le cadre qui se fait au moyen de rivets en fer; l'*Est* a adopté le rivet en fer d'une manière générale sauf pour les réparations n'entraînant pas la descente du foyer et pour lesquelles la rivure à froid s'opère beaucoup plus facilement. La *Compagnie de Lyon* n'emploie que les rivets en fer, il en est de même des Compagnies anglaises.

Ces rivets ont des têtes fraisées diminuant la surépaisseur du métal, ce qui est un point important pour éviter les coups de feu dans des foyers où l'activité de la combustion est poussée plus loin que dans toute autre espèce de chaudière.

Quand les foyers ont des dimensions très vastes, on ne peut constituer les parois latérales et le ciel d'une même plaque (fig. 318, 324) ; on est obligé de rapporter la partie supérieure qui est reliée à chacun des côtés du foyer par une clouure simple qu'il importe de mettre autant que possible à l'abri de l'action directe de la flamme.

Les foyers américains, toujours en acier, sont ordinairement composés de cinq tôles : deux tôles pour les côtés, une plaque tubulaire, une plaque arrière et un ciel (fig. 318, 320). Le ciel est rapporté et rivé à simple clouure aux côtés, dans le voisinage des angles ; c'est lui qui porte les arrondis formant les coins. Cette disposition est adoptée moins par la crainte de ne pas obtenir de l'industrie des tôles d'un développement suffisant qu'afin de faciliter le remplacement des côtés qui s'usent plus vite, surtout dans la partie en contact avec le combustible. Cettte disposition est aussi adoptée en Europe pour les foyers de grandes dimensions (fig. 324 et 325).

Avec le cuivre, l'épaisseur des parois latérales et du ciel n'est jamais inférieure à 13 mm. ; elle varie ordinairement de 14 à 16 mm. pour les chaudières timbrées de 10 à 15 atmosphères. La *Compagnie d'Orléans* emploie seule des plaques de 18 mm. pour celles de ses chaudières qui sont timbrées entre 13 et 15 kg. Dans presque toutes les locomotives anglaises, les côtés et le ciel ont 13 mm. d'épaisseur (exactement 12,7 mm.).

Toutes les machines de l'*État belge*, quelle que soit la pression, ont des plaques de 14 mm.

Quelquefois, quand le ciel est rapporté, on lui donne une épaisseur un peu plus grande qu'aux plaques des côtés.

La plaque tubulaire est à épaisseur variable. Dans la partie qui porte les tubes, son épaisseur est comprise entre 25 et 35 mm. (*Nord* 25 à 30 suivant la pression, *Est* 27, *P.-L.-M.* 25, *P.-O.* 25 à 35, suivant la pression, *Midi*

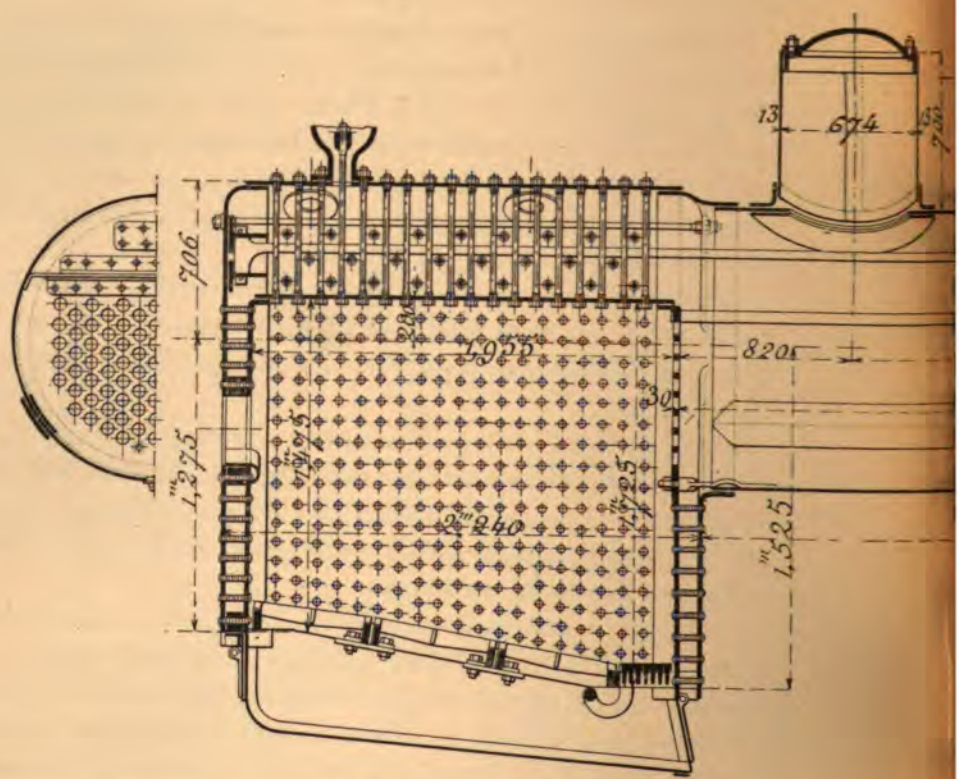


Fig. 321. — Type de chaudière à foyer Belpaire; locomotive

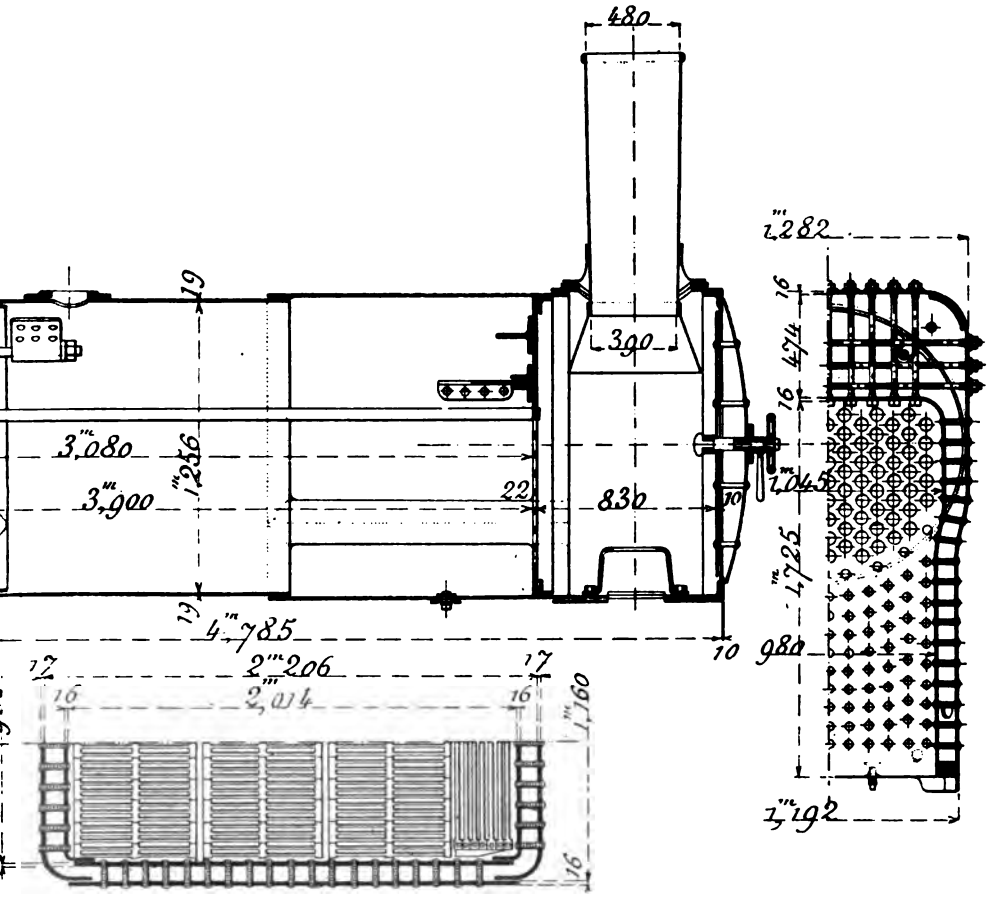
28, *État belge* 26, *Compagnies anglaises* 22,2 et exceptionnellement 25 mm.). La partie amincie, qui se trouve au-dessous de la tubulure, est d'épaisseur inférieure à celle de la partie haute, de 10 à 15 mm. ; autant que possible, on lui donne la même épaisseur qu'aux côtés du foyer.

Les arrondis formant le raccordement entre les côtés et le ciel ont ordinairement un rayon d'environ 0,100 m. ; ceux de la plaque tubulaire avec ses pinces relevées varie de 0,012 m. à 0,030 m.

Dans les foyers en acier (fig. 326), les épaisseurs sont beaucoup moins

considérables; c'est, nous l'avons vu, un des éléments de succès. Les épaisseurs usuelles aux États-Unis sont les suivantes, pour des pressions variant de 10 à 13 kg. :

Côtés	7,9 mm.
Ciel	9,5 —
Face arrière	7,9 —
Plaque tubulaire	12,7 —



mpound à grande vitesse (série 2121-2157) du *Chemin de fer du Nord.*

Quelques locomotives de la *Compagnie de Lyon* ont reçu, à titre d'essai, des foyers en acier dont les parois ont une épaisseur de 9 mm. ; la plaque tubulaire a 15 mm.

Les quarante locomotives du *Great Eastern Ry* actuellement pourvues de foyers en acier (fig. 327) ont des plaques de 6,4 mm., la plaque tubulaire a 12,7 mm. dans la partie qui reçoit les abouts des tubes et 6,4 mm. dans le bas.

Nous extrayons, d'une note technique qu'a bien voulu nous communiquer

M. l'ingénieur en chef Salomon, les renseignements suivants relatifs aux foyers des locomotives de la Compagnie de l'*Est*.

Les plaques constituant le foyer sont assemblées entre elles à simple clouure au moyen de rivets en fer de la qualité dite « fer de Suède ».

Dans la plupart des foyers, la plaque enveloppe est formée d'une seule pièce. Quelques séries de machines ont des foyers avec plaque enveloppe en trois parties assemblées au moyen de clouures à simple rangée de rivets en fer.

Ce n'est que dans les réparations partielles (sans démontage du foyer)

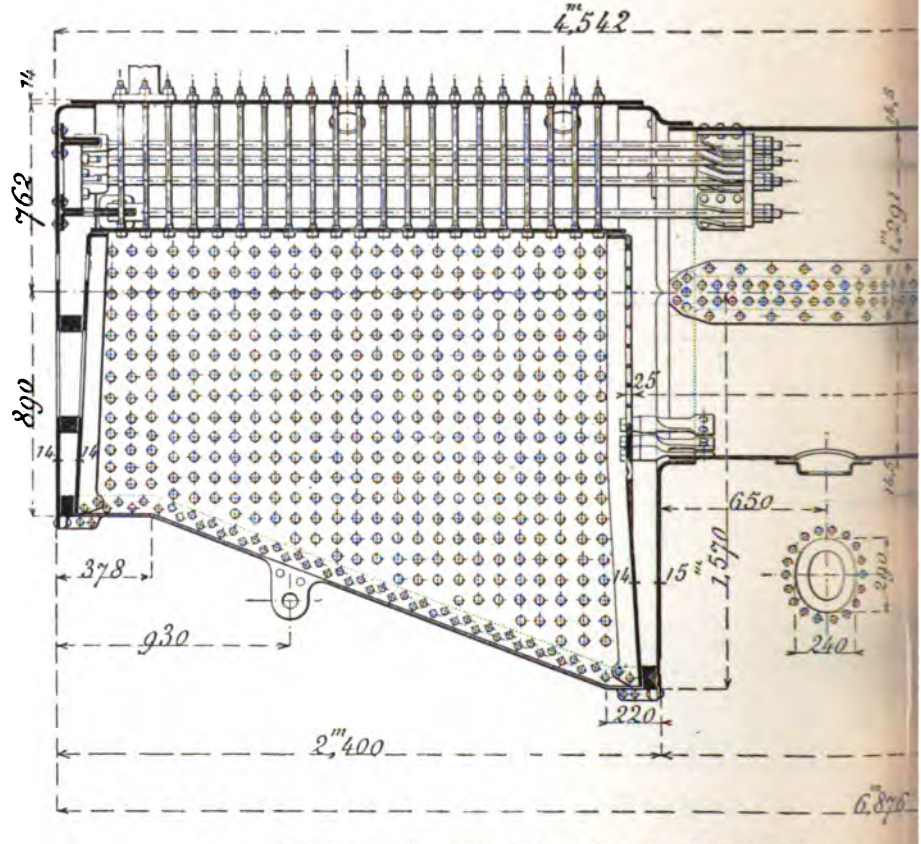


Fig. 322. — Chaudière, à foyer Belpaire, des locomotives compo

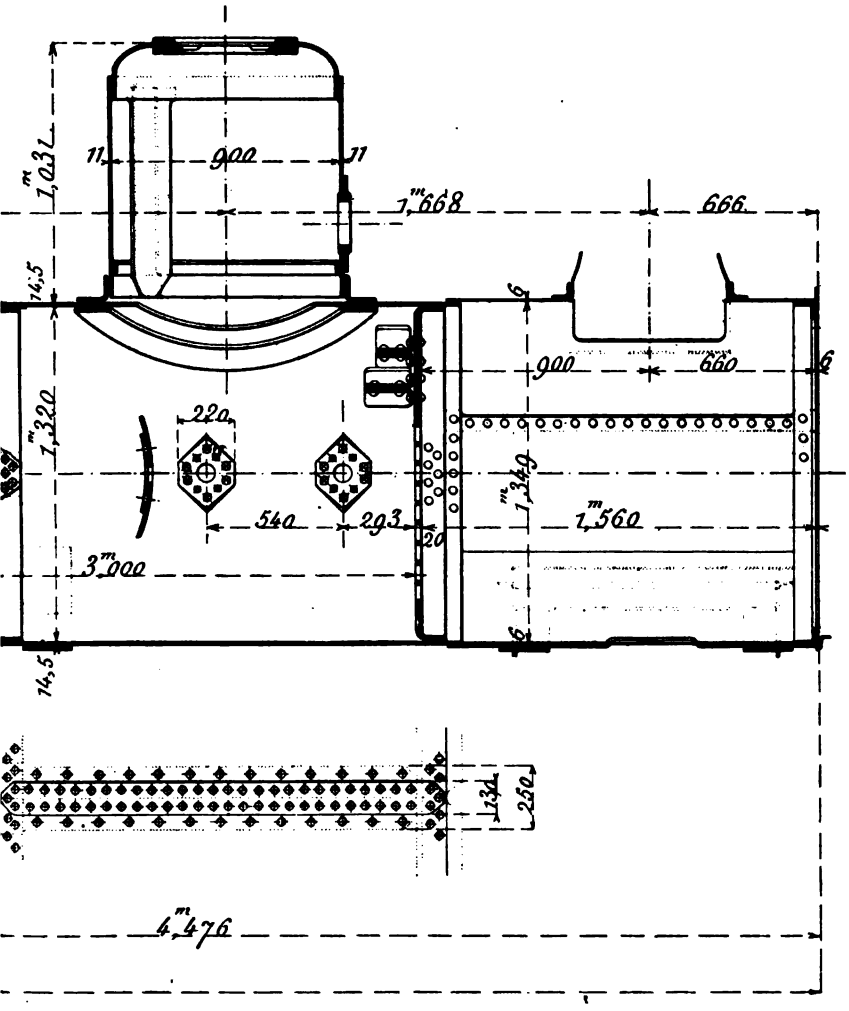
qu'on emploie des rivets en cuivre, lorsqu'il y a impossibilité de poser des rivets en fer.

La Compagnie n'emploie pas de rivets en bronze et en acier.

Dans les séries de locomotives à petit foyer l'épaisseur des parois varie de 13 à 14 mm. pour des pressions effectives comprises entre 7,5 kg. et 8,5 kg.

Dans les grands foyers, l'épaisseur varie entre 14 et 15 mm. pour des pressions de 9 à 13 kg.

Les plaques tubulaires sont toujours renforcées à l'endroit des tubes et ont en général dans cette partie une épaisseur de 27 mm., sauf dans quelques machines où l'épaisseur est de 20, 25, 26 et 30 mm.



ande vitesse (série C-21-60) des *Chemins de fer P.-L.-M.*

Le tableau suivant, page 392, fait connaître les épaisseurs adoptées actuellement pour chacune des séries de locomotives.

191. Cadre du foyer. — La liaison entre le foyer et son enveloppe, à la partie basse, est opérée à l'aide d'un cadre de forme rectangulaire métallique et continu formant cale pour séparer les parois, dont l'espacement constitue

les lames d'eau, et que traversent les rivets reliant les plaques extérieures et intérieures.

Ce cadre est ordinairement en fer forgé de la meilleure qualité, constitué de deux ou quatre portions confectionnées à part, puis soudées dans le voisinage des angles. Quelques Compagnies étrangères, entre autres le *Lancashire and Yorskshire Ry*, font aujourd'hui leurs cadres de chaudières en acier moulé, ce qui diminue beaucoup la main-d'œuvre ; cette pratique est appelée à se répandre.

Il est rare que le cadre puisse être paré à la forge avec assez de perfection

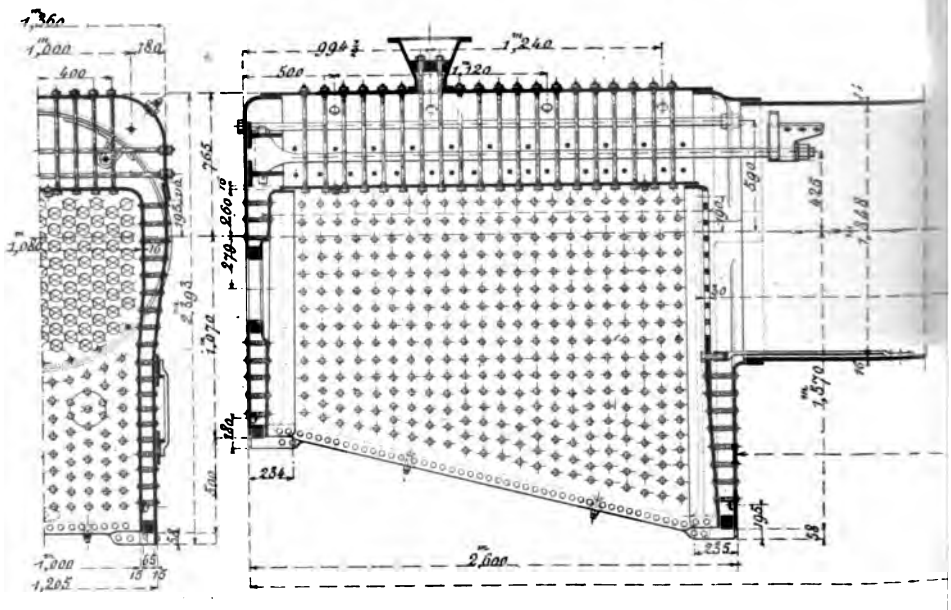


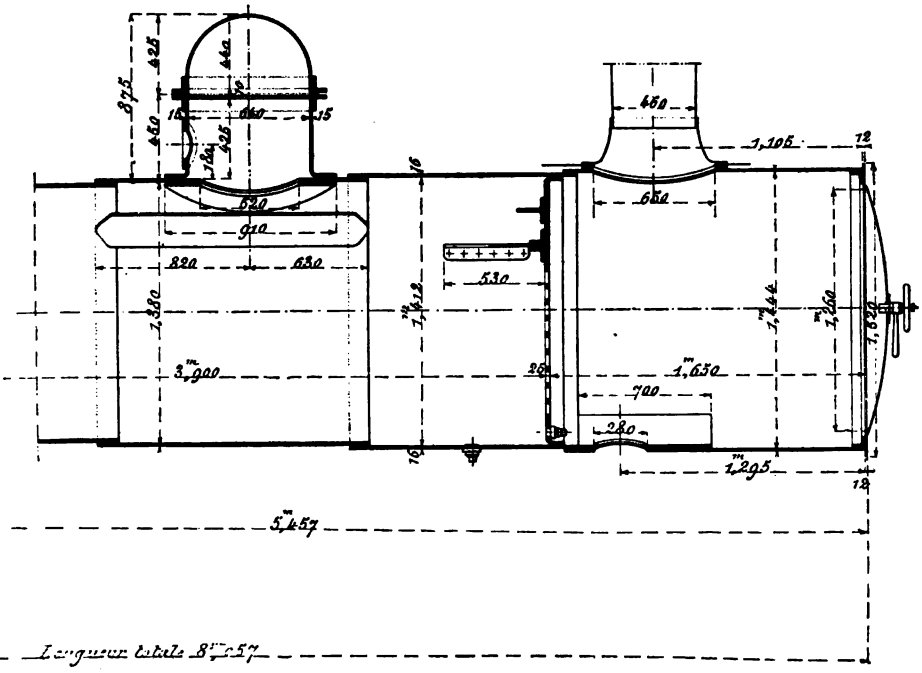
Fig. 323. — Chaudière des locomotives compound à grande vitesse

pour qu'on puisse le placer tel quel. Presque toujours on rabote ses faces verticales et on achève les arrondis des angles à la machine à mortaiser.

Les tôles d'enveloppe et les plaques du foyer sont fixées entre elles et au cadre à l'aide de rivets dont les têtes sont fraisées du côté intérieur. Dans les parties arrondies formant les angles, ces rivets sont placés normalement. Le développement de l'arête intérieure étant, en raison de l'épaisseur du cadre, notablement inférieur à celui de la face extérieure, on peut se trouver gêné pour l'installation de ces rivets, comme on le voit figure 330, les têtes de rivets voisins se touchant du côté intérieur et se trouvant au contraire, sur l'extérieur, à une distance trop grande pour assurer l'étanchéité de l'enveloppe. On remédie à cet inconvénient par deux procédés. Dans le premier, figure 330 (8), on remplace quelques rivets des angles par des prisonniers vissés dans le cadre par l'extérieur et dont les têtes sont

rivées à froid. En France et en Europe en général, on donne la préférence à la seconde disposition (fig. 340) ; on fait venir de forge avec le cadre, à sa partie inférieure, dans les arrondis des coins, des appendices plus minces formant saillie, sur lesquels viennent s'appliquer des oreilles découpées dans les tôles extérieures qui y sont fixées par de courts rivets.

On trouvera (fig. 328) quelques spécimens de cadres de foyers montrant la forme qu'ils peuvent affecter. Quand le foyer est profond ou plonge



Chemins de fer du Midi (Société alsacienne de constructions mécaniques).

entre deux essieux où se trouve un porte à faux à l'arrière, le cadre est rectiligne et le plus souvent horizontal, à moins que l'on ne désire incliner légèrement la grille qui est disposée parallèlement au cadre. Quand le foyer doit passer au-dessus d'un essieu, le cadre, dans le plan vertical, affecte la forme d'une ligne plus ou moins brisée suivant le diamètre des roues sur lesquelles cet essieu est monté, ou la profondeur que l'on désire donner au foyer vers l'avant. Dans le type le plus fréquemment adopté, les parties avant et arrière du cadre sont horizontales et réunies par une portion inclinée.

On trouvera un exemple de cette disposition figure 367, qui représente en coupe le foyer des express compound de la *Compagnie de Lyon* (série C-21-60). Ce cadre porte, de chaque côté, un peu en arrière de son milieu, à la partie inférieure, un appendice venu de forge et percé d'un œil qui sert

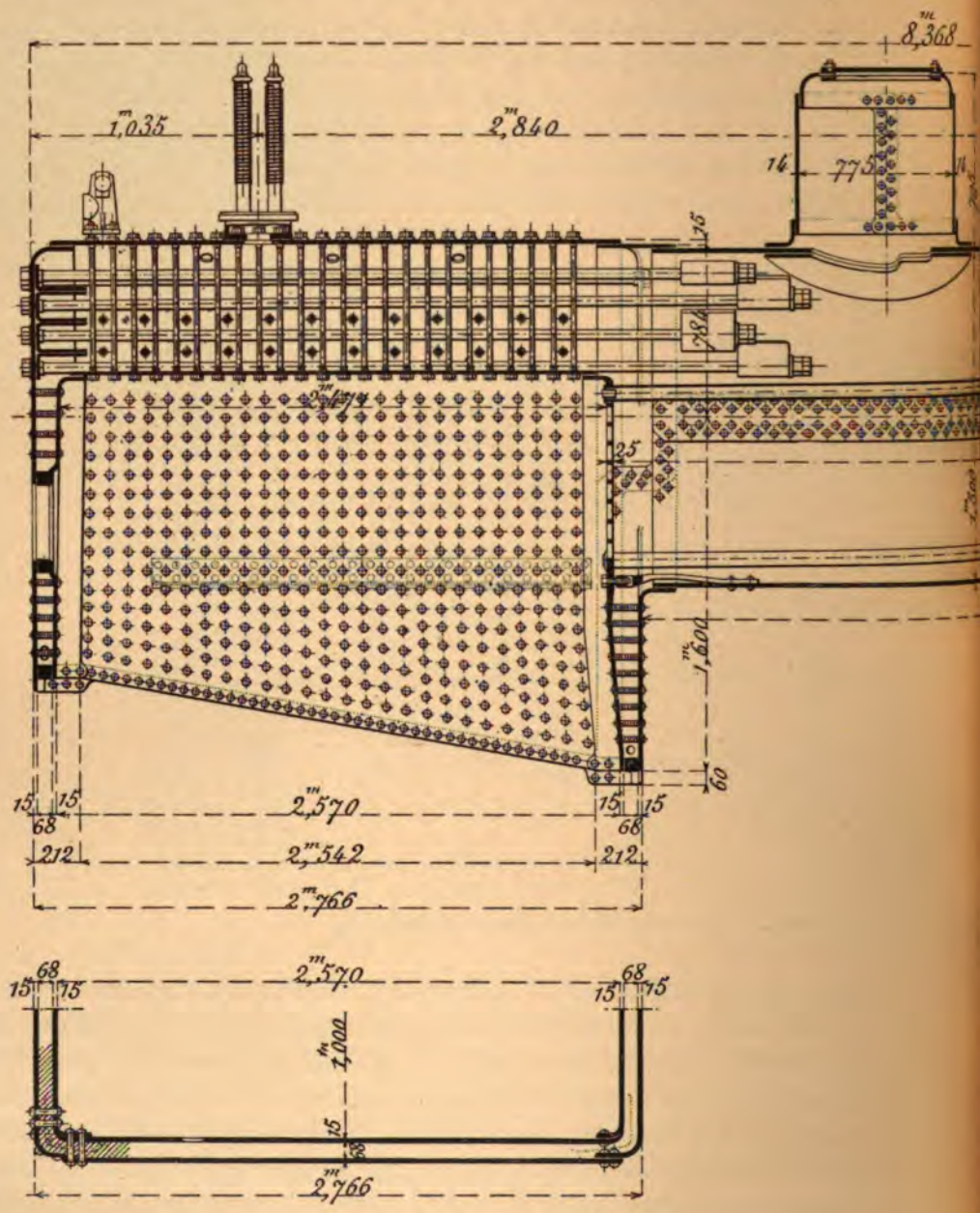
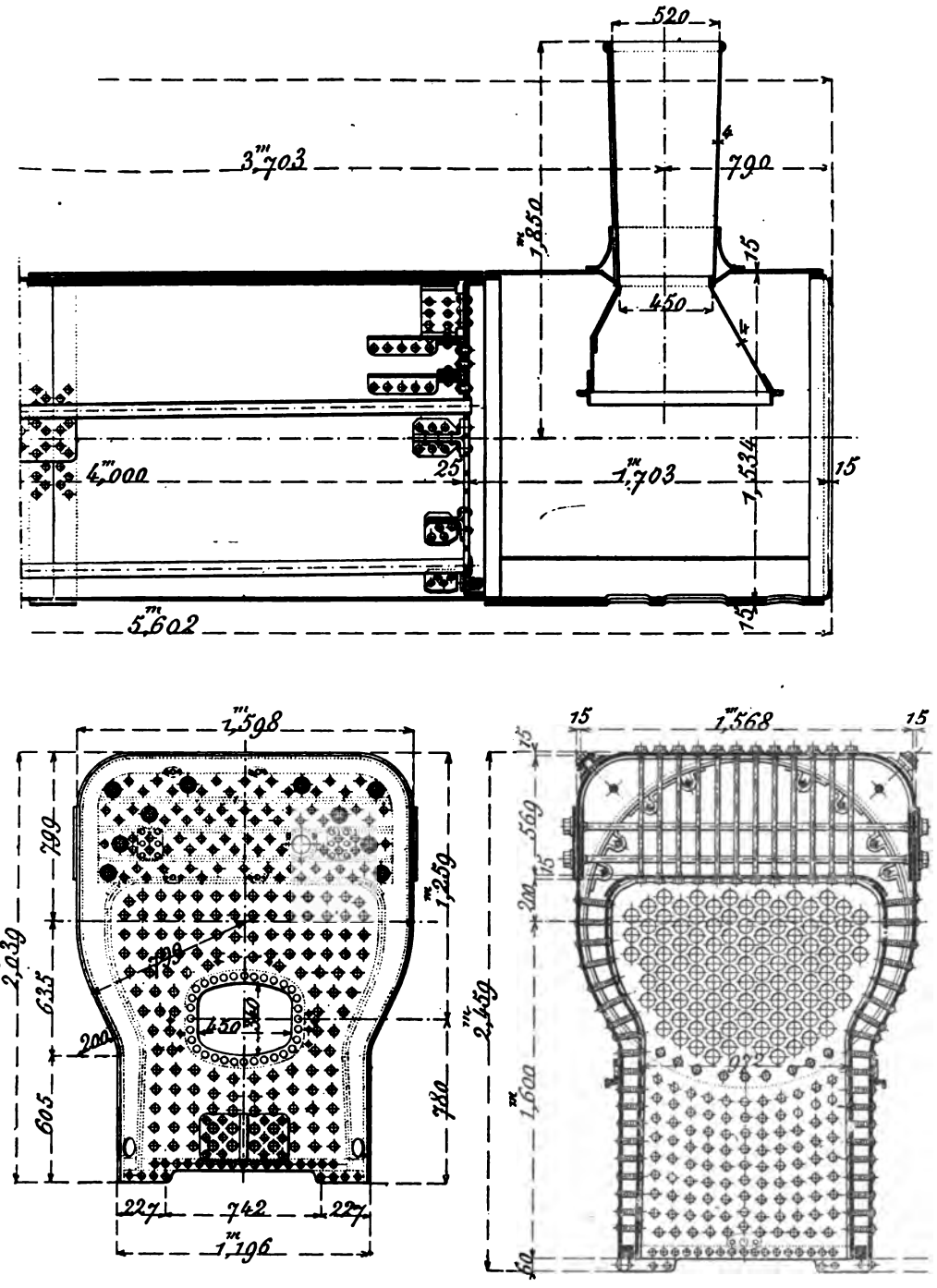


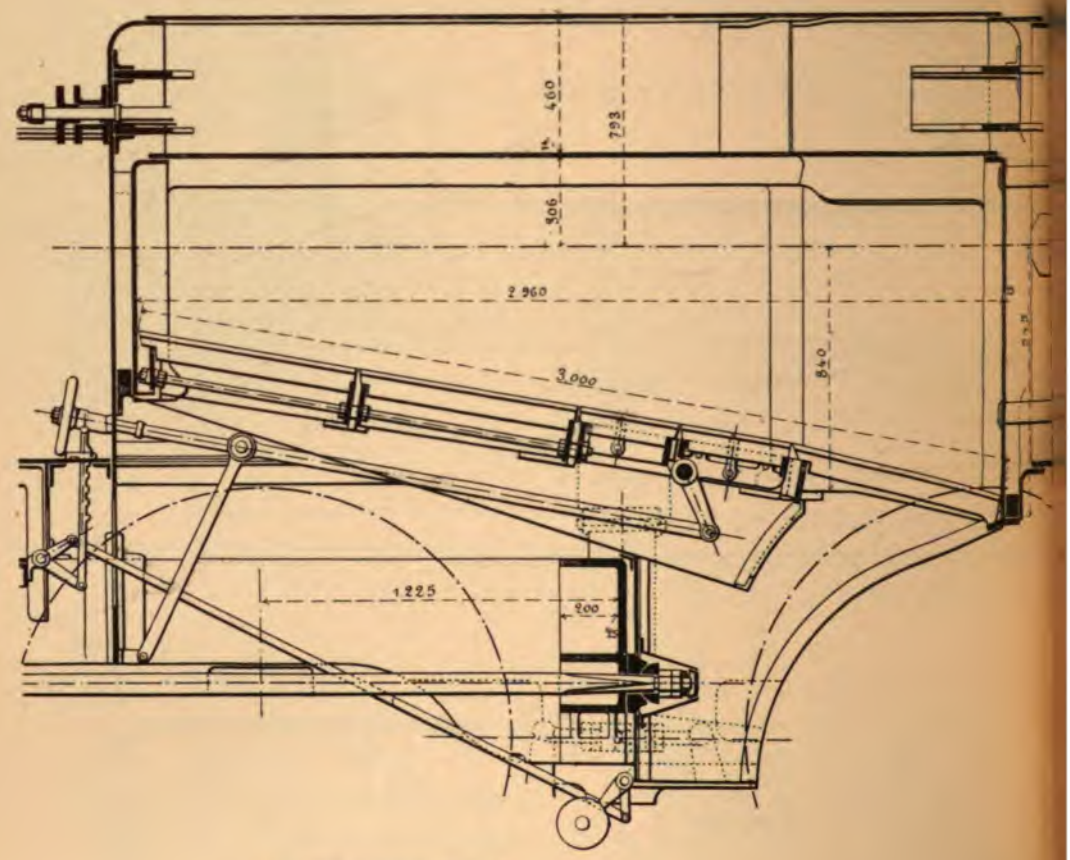
Fig. 324. — Chaudière des locomotives à six roues accouplées

à l'attache de la chaudière sur les longerons au moyen de bielles pendantes, dispositif encore exceptionnel en France.



t à bogie (série 2301-2304) des *Chemins de fer de l'Ouest.*

Le cadre porte généralement de petites ouvertures verticales percées suivant toute sa hauteur et parfois sur toute sa largeur, bouchées par des



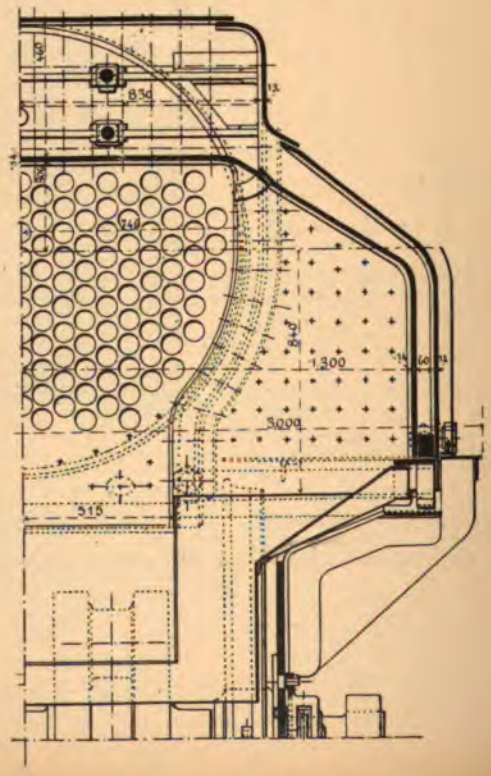
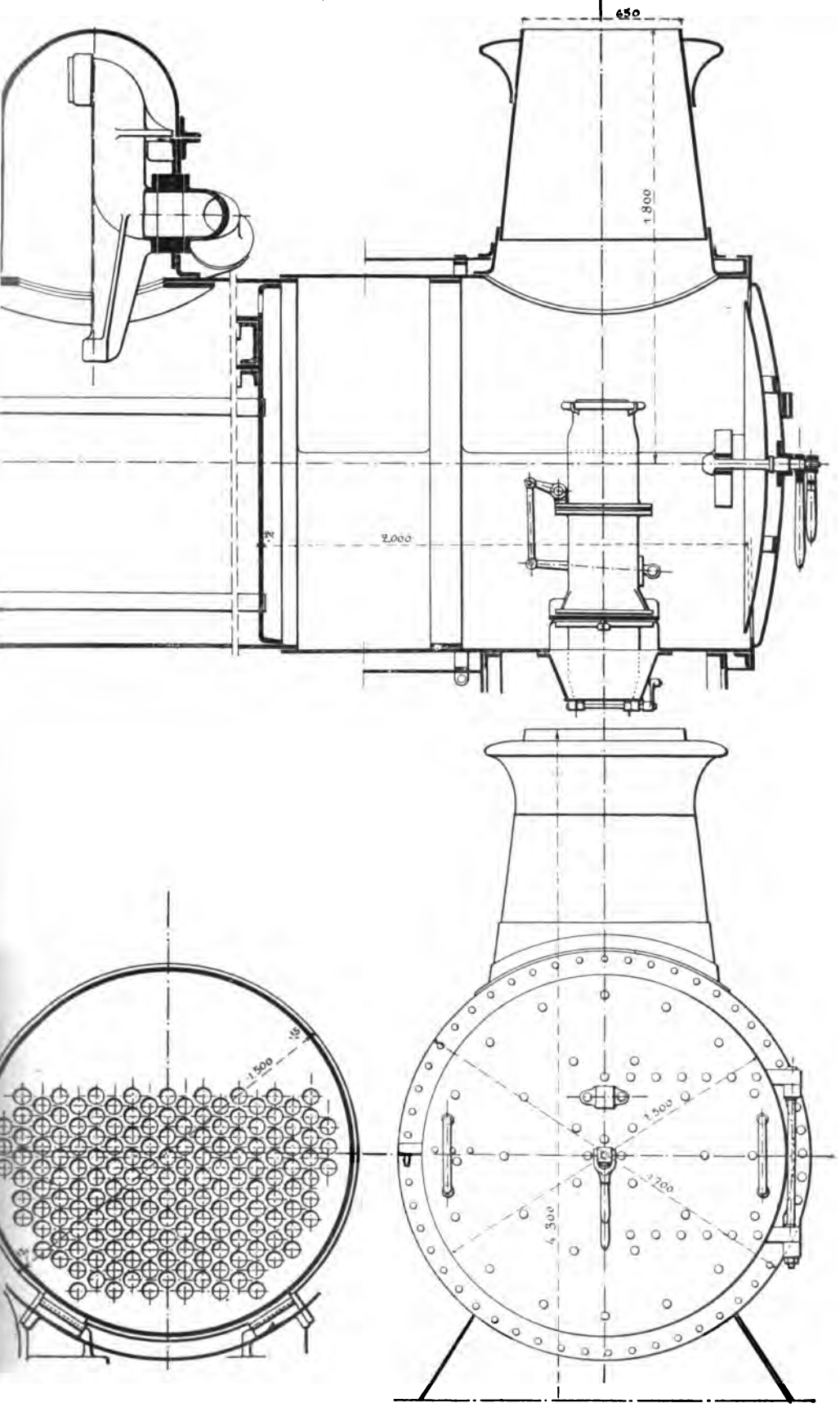


Fig. 325. — Chaudière, avec foyer



aire débordant au-dessus des roues, des locomotives du type 6 renforcé de l'*État belge*.

ÉPAISSEUR DES PAROIS EN CUIVRE DU FOYER DANS LES LOCOMOTIVES DE LA COMPAGNIE DE L'EST

NUMÉROS DES LOCOMOTIVES	NOMBRE de machines par série.	PRESSION effective de la vapeur.	SURFACE de grille.	ÉPAISSEURS DES : PLAQUES TUBULAIRES Partie inférieure.	PLAQUES TUBULAIRES Partie supérieure.	PLAQUES arrières.	PLAQUES ENVELOPPES Partie inférieure.	PLAQUES ENVELOPPES Partie supérieure.	PLAQUES supérieures constituant le ciel.
		kilogr.	m. carré.						
1 à 78	39	7,5 à 9	1,03	13	27	13	13	13	13
79 à 90, 174 à 188, 601 à 612	31	7,5 à 9	1,22 à 1,30	14	27	14	14	14	14
604	1	11	1,72	14,5	27	14,5	14,5	14,5	14,5
158 à 173	2	7,5	1,23	13,5	25	13,5	13,5	13,5	13,5
91 à 100, 304 à 361	62	7,5 à 9	1,05	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
101 à 135, 142 à 157	36	7,5 à 9	1,19	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
101 à 135, 142 à 157 avec foyer allongé	13	10	1,63	14	25	14	14	14	14
189 à 222, 243 à 258	8	8 à 9	1,15	14	27	14	14	14	14
189 à 222, 243 à 258 avec foyer allongé	39	9	1,50	14	27	14	14	14	14
232-236	2	8	1,10	13	27	13	13	13	13
261 à 285	25	8,5 à 9	0,99	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
362 à 420, 421 à 440	65	7,5 à 9	1,16	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
441 à 485	45	10	1,71	14,5	27	14,5	14,5	14,5	14,5
501 à 510	8	10	1,73	14	30	14	14	14	14
508 et 509	2	12	1,75	13,6	26	13,6	13,6	13,6	(16,5 acier.)
511 à 542	32	10	2,39	14	27	14	14	14	14
543 à 562	20	10	2,40	14	30	14	14	14	14
613 à 683	71	10	1,82	15	27	15	15	15	15
684 à 692	9	11	2,26	15	27	15	15	15	15
693 à 698	6	12	2,26	15	27	15	18	15	15
699 à 704	6	12	2,26	15	27	15	15	15	15
705 à 728	24	12	2,26	15	27	15	15	15	15
801 à 812	12	12	2,42	13,8	26,8	13,8	13,8	13,8	(16,5 acier.)
813 à 824	12	12	2,42	13,6	26,4	13,6	14,5	14,5	14
1002 à 1005	4	13	2,59	14	25	14	14	14	14
B¹ à B³	3	9	0,49	11	20	11	11	11	11
L.S. 20 à 22	3	9	2,11	15	27	15	15	15	15
01 à 032	29	7,5 à 9	0,96	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
033 à 0120, 0121 à 0164, 0212 à 0241, 0189 à 0200	158	7,5 à 9	1,12	13,5	27	13,5	13,5	13,5	13,5
0165 à 0166	2	10	1,08	13	27	13	13	13	13
0169 et 0170, 0171 à 0182, 0201 à 0210, 0242 à 0249	32	7,5 à 9	0,90	13	27	13	13	13	13
0901 à 0948	48	9	1,26	13	27	13	13	13	13
0250 à 0478 et 0766	141	7,5 à 9	1,35	15	27	15	15	15	15
0250 à 0428	61	9	1,63	15	27	15	15	15	15
0250 à 0500, 0701 à 0765	105	9 à 12	1,63	15	27	15	15	15	15
0501 à 0563	7	7,5 à 8,5	1,92						
0501 à 0563	14	8,5	1,91	15	27	15	15	15	15
0501 à 0563	22	8,5	1,90						
0501 à 0691	147	9	1,92						
0538	1	10	4,68	16	27	16	16	16	16
L. S. 43, 44, 48 à 52	7	9	2,11	15	27	15	15	15	15
L. S. 53 et 54	2	9	1,34						
0183, V¹ à V⁷	8	9	1,14	13	27	13	13	13	13
A¹ et A²	2	8,5	1,07						

autoclaves, et qui servent pour le lavage de la chaudière. Il en résulte un affaiblissement fâcheux du cadre et des attaches des plaques puisqu'on ne peut disposer de rivets par le travers de ces ouvertures ; on les remplace par des prisonniers rivés quand le cadre n'est pas coupé entièrement.

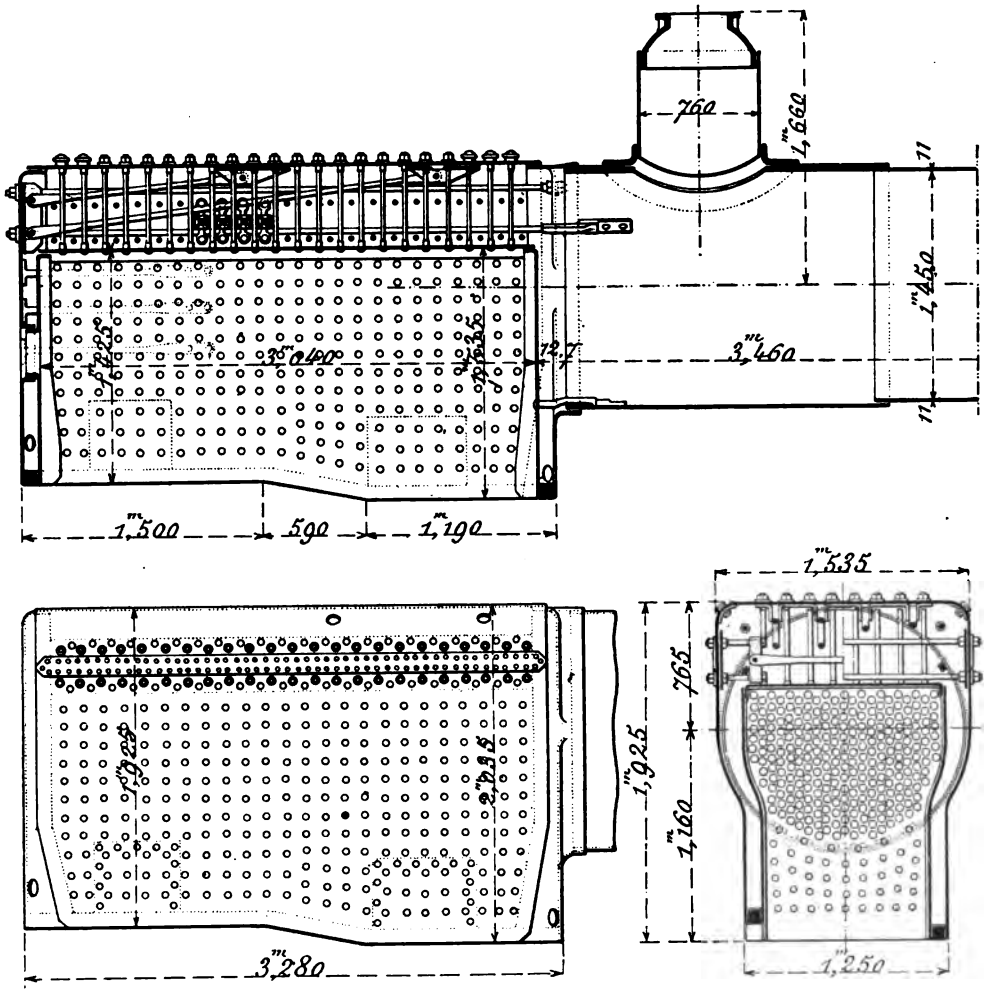


Fig. 326. — Foyer en acier des locomotives à grande vitesse (type P ; de 1895) du *Pensylvania Railroad.*

Pour parer à cet inconvénient, on remplace parfois les autoclaves par des bouchons coniques à vis dont le diamètre est moins considérable et qui, par conséquent, affaiblissent moins le cadre. On en trouvera un exemple figure 331 (Mach. compound de la Compagnie du Midi).

La *Compagnie de l'Est*, l'*Etat belge*, l'*Etat hollandais*, presque toutes les Compagnies anglaises et américaines emploient, pour l'assemblage des plaques sur le cadre, la rivure simple, sauf dans les coins. Les autres

administrations adoptent la rivure à double rangée ; la *Compagnie du*

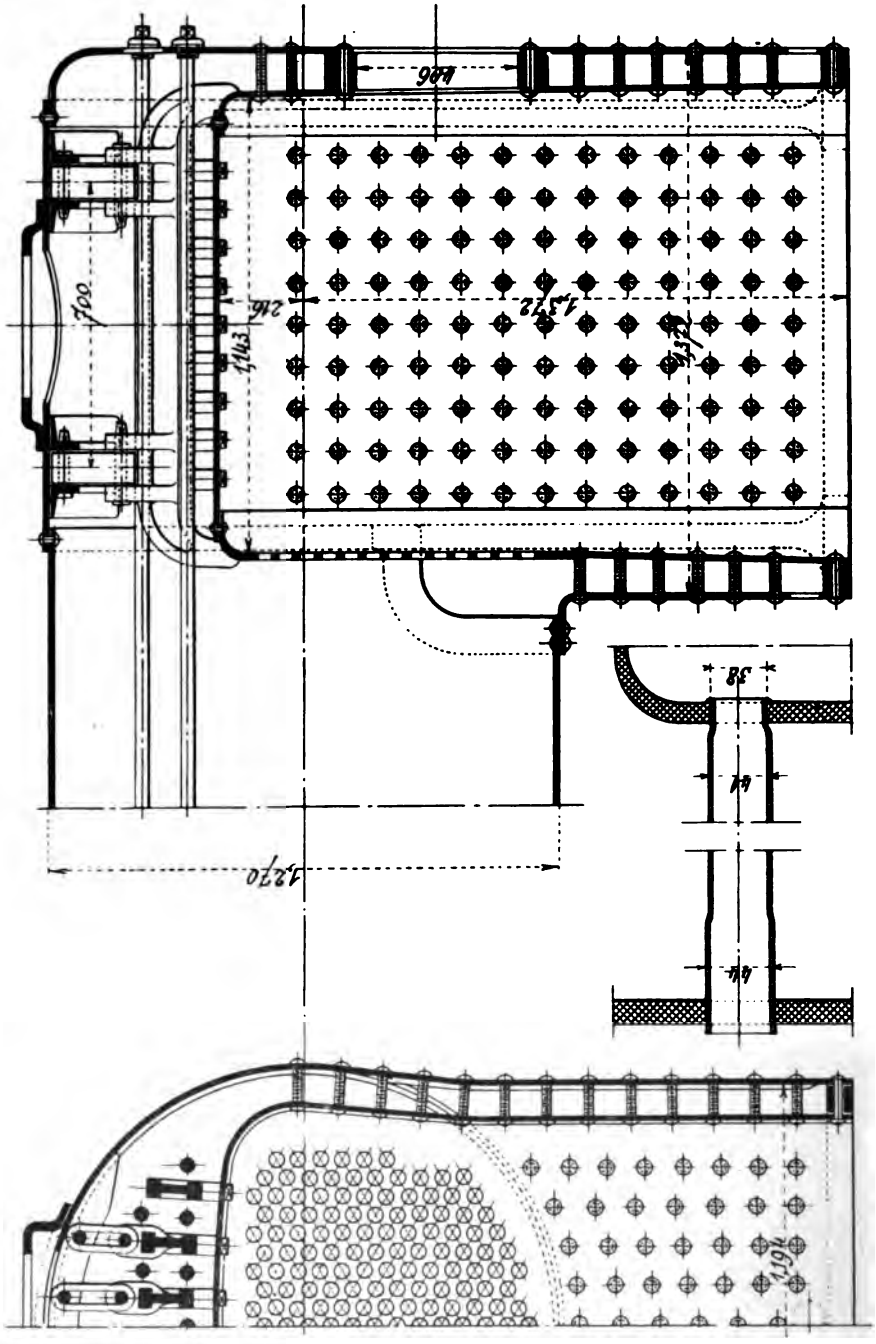


Fig. 327. — Foyer en acier appliqué à un certain nombre de locomotives du *Great Eastern Railway*.

Nord admet les deux systèmes selon les types de locomotives et les pressions.

Quand la rivure est simple, la hauteur du cadre peut s'abaisser à 60 mm.

et n'atteint que rarement 80 mm. ; le plus souvent elle est voisine de 70 mm. Quand la rivure est double, cette hauteur varie de 80 à 100 mm.

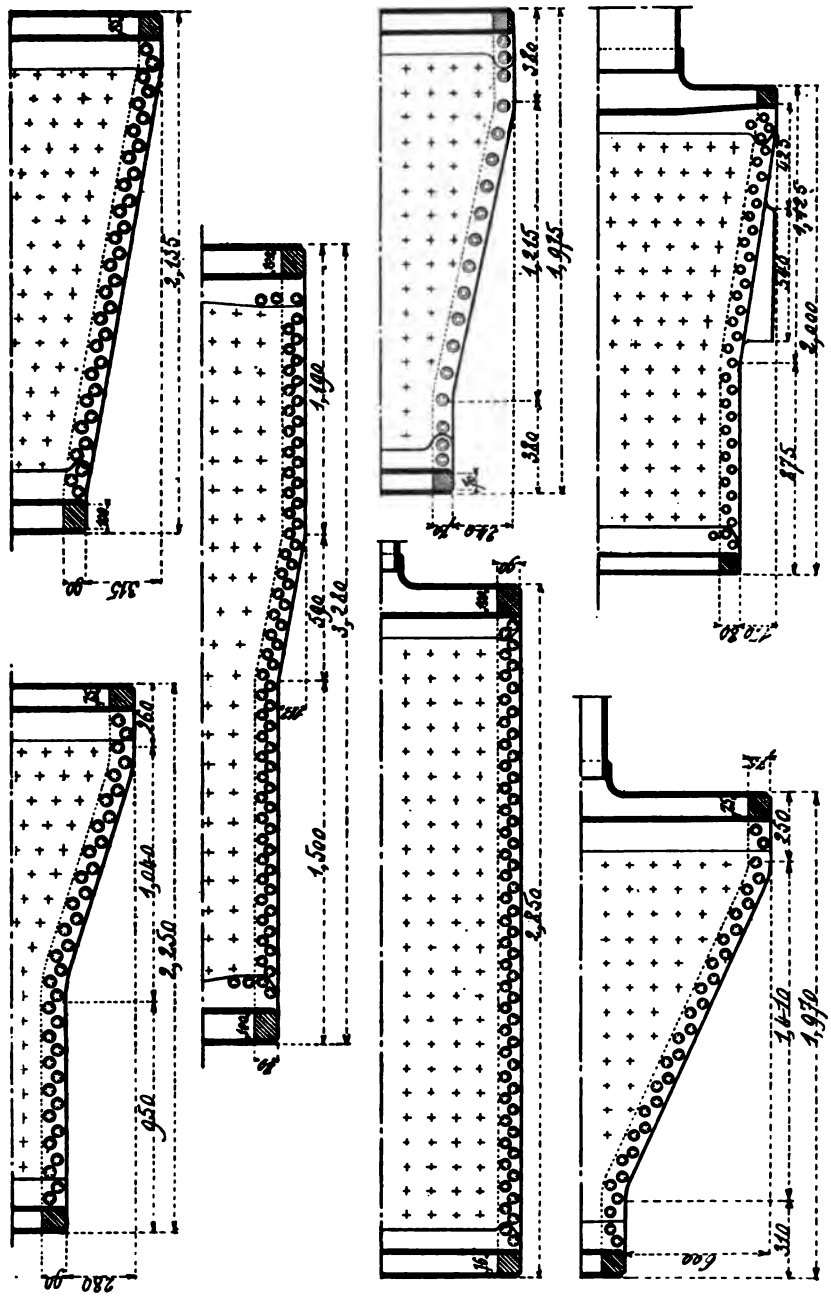


Fig. 328. — Formes diverses que peuvent affecter les cadres de foyer, suivant la position longitudinale qu'ils offrent par rapport aux essieux.

L'épaisseur du cadre dépend de la largeur que l'on veut donner à la lame d'eau ; elle varie de 50 à 100 mm., cotes extrêmes rarement atteintes, et

oscille généralement entre 55 à 80 mm. Exceptionnellement, les locomotives express du *Great Western Ry*, dans lesquelles on a cherché à accroître la

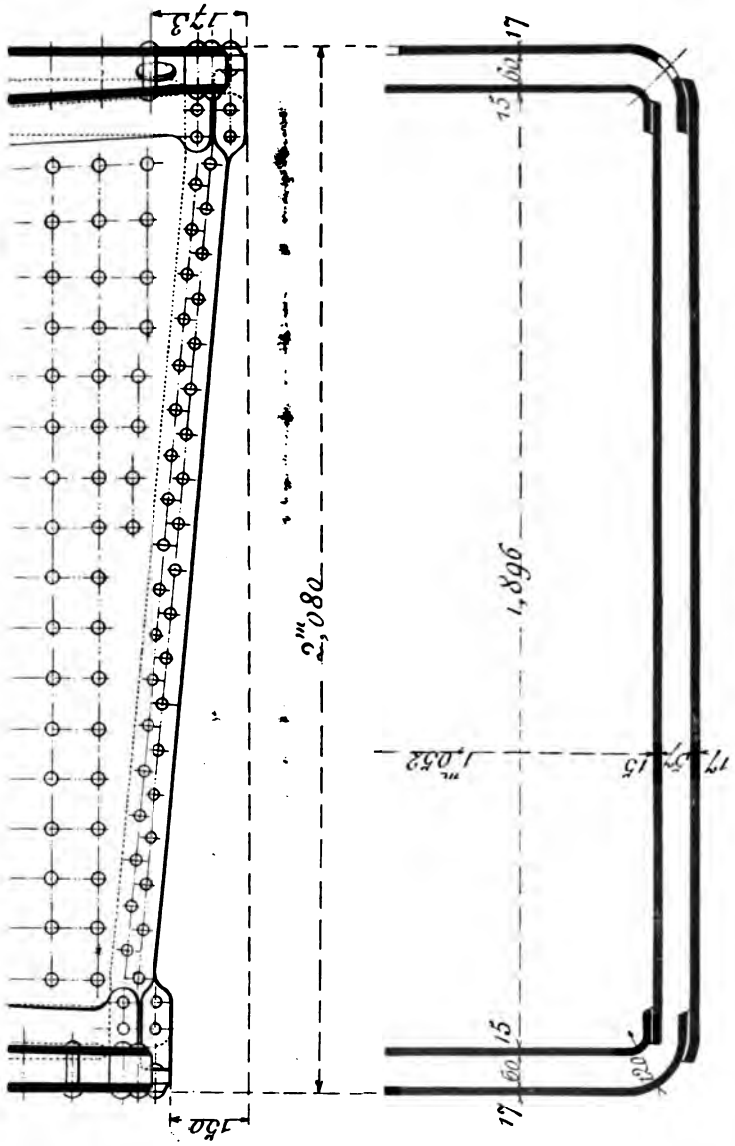


Fig. 329. — Assemblage des plaques du foyer sur le cadre.

grille sans augmenter la longueur extérieure du foyer, ont des cadres de 42 mm. seulement d'épaisseur.

192. Enveloppe de la boîte à feu. — Autant que possible, on constitue l'enveloppe d'une seule tôle cintrée suivant sa longueur, les génératrices des parties cylindriques étant dirigées dans le sens perpendiculaire au laminage (fig. 316, 319, 321) ; mais quand le foyer est très long, on ne trouve

plus de tôles assez larges et l'enveloppe est placée en long : on la forme

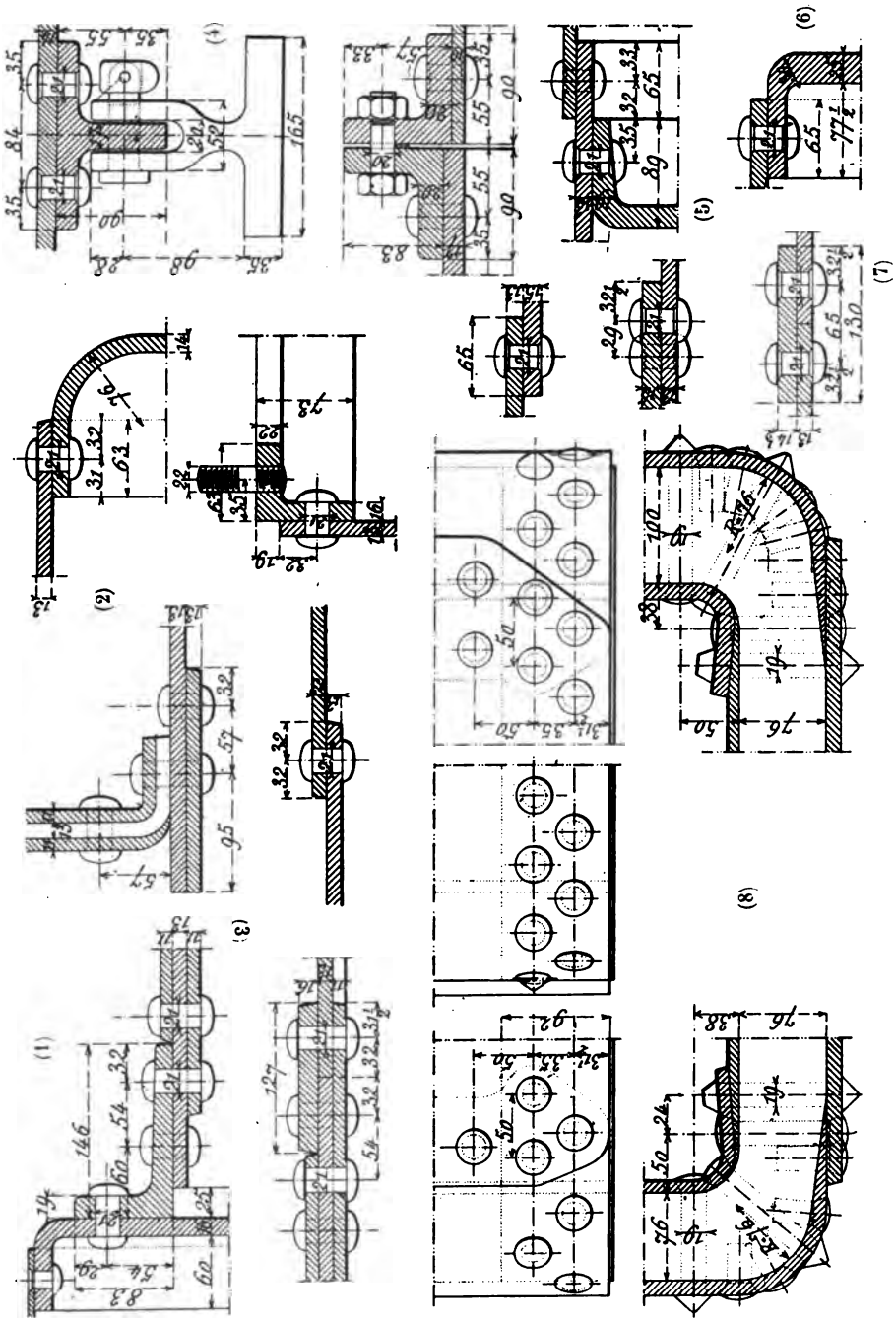


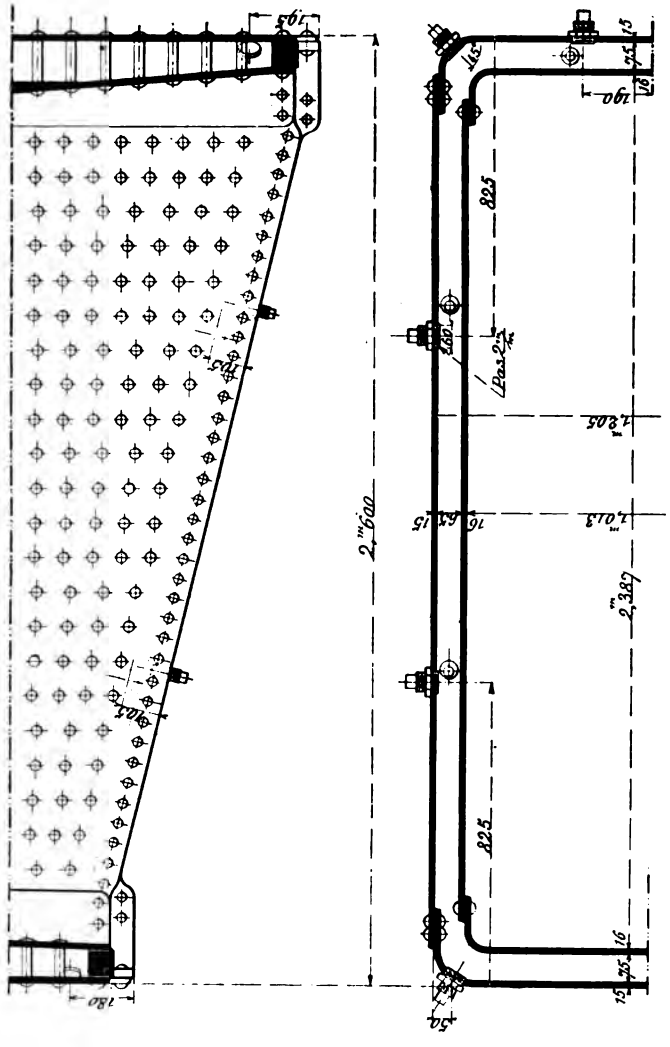
Fig. 330. — Détails divers de construction des chaudières :

(1) Assemblage du corps cylindrique sur la plaque tubulaire avant, *Great Eastern Railway* ; (2 et 3) détails du rivetage du corps cylindrique, *Great Eastern Railway* ; (4) supports des tirants à dilatation des ciels de foyer de l'*État belge* ; (5) détail des assemblages divers du corps cylindrique, *État belge* ; (6) assemblage de la plaque tubulaire sur le ciel de foyer, *État belge* ; (7) couvre-joints et rivetage du corps cylindrique, *État belge* ; (8) cadre de foyer et rivetage, disposition américaine.

alors de trois tôles dont deux, symétriques, constituent les côtés et une autre la partie supérieure ; le joint de ces tôles est placé à peu près à la hauteur

du ciel, autant que possible au-dessus de la rangée supérieure d'entretoises (fig. 323, 324, et 325).

Les deux pinces inférieures de l'enveloppe sont rivées au cadre du foyer par une clouure double ou simple ; les deux rivures d'assemblage avec


2,m600
825
825
2,m387
2,m205
2,m013
190
190
180
54
16
15
25
25
15
16
15
25
25
15
16
15
25
25
15

193. Façade arrière de la boîte à feu. — La face arrière de la boîte à feu est constituée par une tôle rivée à sa partie inférieure au cadre du foyer, vers son milieu au cadre de la porte et rattachée au berceau par une pince relevée comportant une ou deux rangées de rivets suivant la pression de régime. Cette pince étant tournée vers le côté intérieur, le rivetage ne peut se faire qu'à la main; en vue de pouvoir l'effectuer mécaniquement, ce qui est préférable quand on le peut, surtout avec des tôles d'acier sur lesquelles on doit éviter autant que possible l'action du martelage et les chocs, quelques constructeurs tournent la pince vers l'arrière, mais cette disposition est peu usitée. On en trouvera un exemple, figure 332 (*Réseau de l'Adriatique*).

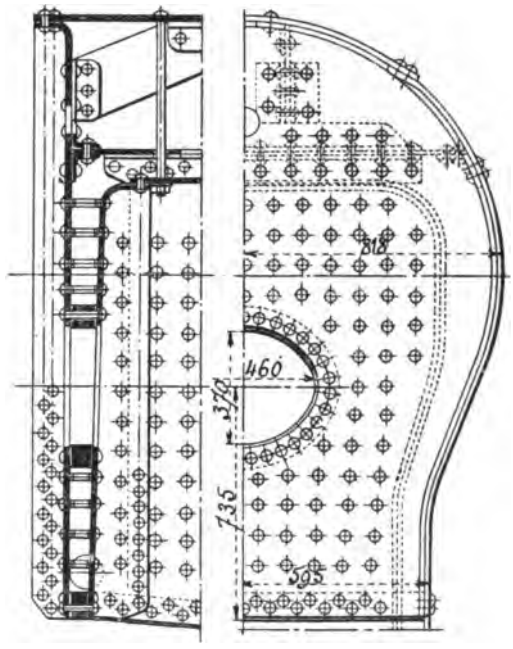


Fig. 332. — Disposition de la plaque arrière des chaudières des locomotives (groupe 450) du réseau *Adriatique*. L'emboutissage est tourné vers l'arrière ce qui permet de faire à la machine le rivetage de la pince d'attache avec le berceau.

Le cadre de la porte est ordinairement constitué par un anneau de forme elliptique ou circulaire et de section rectangulaire, diminutif du cadre du foyer et qui est, comme ce dernier, interposé entre la tôle d'enveloppe et la plaque; il est traversé par les rivets d'attache (fig. 333).

Aux États-Unis, on supprime presque toujours le cadre de la porte ; la tôle extérieure et la plaque du foyer sont reliées par deux pinces embouties, en contact, et reliées par une simple clouure. On trouvera figure 335 deux exemples des dispositions les plus usitées. Quelques Compagnies européennes suivent, tout au moins pour certaines de leurs machines, sinon pour la totalité, une pratique analogue; la figure 334 représente la disposition adoptée pour les locomotives du chemin de fer *Nord Empereur Ferdinand* (Autriche). Le cadre simple, tel qu'il est adopté généralement, nous paraît préférable, il est peu coûteux et permet de ne pas emboutir les tôles au pourtour de la porte; on fait toujours assez d'emboutissages dans les chaudières.

Les emboutis de la pince de pourtour de la façade doivent avoir des arrondis d'aussi grand diamètre que possible afin d'éviter la fatigue du métal et de faciliter l'opération; on augmente en outre la portion de la façade qui

est capable de résister par elle-même à l'action de la pression intérieure et permet de se dispenser d'armatures. Les Anglais ont, dans ce sens, été

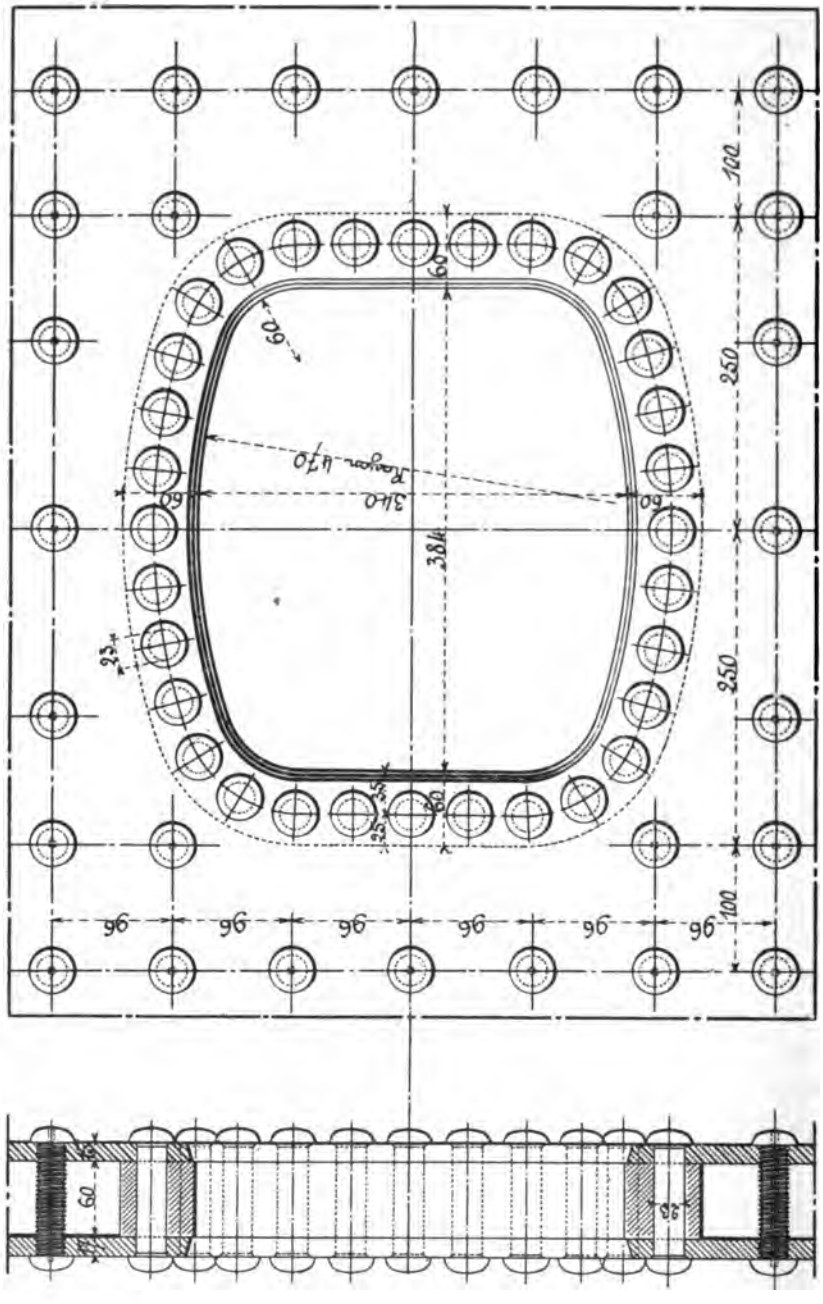


Fig. 333. — Exemple de disposition du cadre de la porte du foyer (*Ouest*).

beaucoup plus loin que nous; les arrondis des parties embouties du fond de certaines de leurs chaudières ont jusqu'à 0,25 m. de rayon. On verra, d'après

l'examen des figures 314 et 315, que cette pratique leur permet de simplifier l'armaturage des fonds.

Dans la partie comprise entre le bas de l'arrondi de la pince emboutie et la rangée supérieure d'entretoises, la façade arrière de la chaudière offre une face plane d'une certaine étendue qui a besoin d'être consolidée, et armaturée.

Autrefois, on employait exclusivement à cet effet de longs tirants, boulonnés sur la plaque tubulaire avant et sur la façade arrière, qui étaient encombrants et gênaient pour les visites et les nettoyages de chaudières. Cependant, cette pratique est encore suivie en Angleterre et aux États-Unis par un grand nombre de constructeurs (fig. 314, 315, 317, 318); l'inconvénient de cette disposition est moindre quand les chaudières sont courtes et qu'il n'y a qu'une rangée de tirants, c'est peut-être alors le système le plus léger et le plus facile à mettre en place. Au *Caledonian Ry* (fig. 315) on place de chaque côté de plan vertical médian du corps cylindrique un tirant, vissé dans la façade arrière renforcée au pourtour par une plaque doublante rivée, avec écrou extérieur et relié, à son extrémité avant, par une fourche que traverse un axe goupillé, à un fer T rivé sur la plaque tubulaire. Ces tirants sont munis, en leur milieu, d'un écrou de réglage à deux filets de pas contraire, qui permet d'opérer, lors de la construction, un serrage énergique. Ce réglage est difficile à effectuer lors des réparations par suite de la couche de tartre qui vient recouvrir les filets.

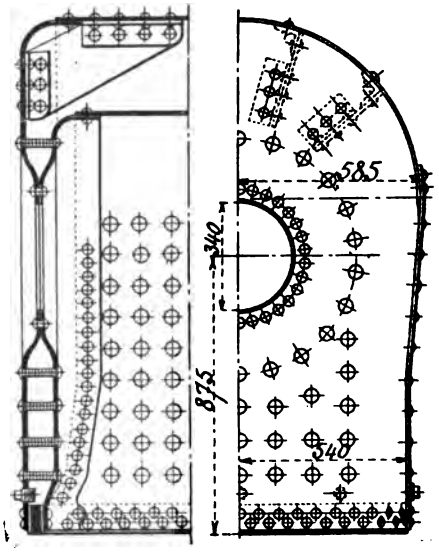


Fig. 334. — Face arrière de la boîte à feu des locomotives du type 7 du *Nord-Empereur-Ferdinand* : le cadre de la porte du foyer est remplacé par l'assemblage de pinces relevées dans les deux plaques.

Au *Lancashire and Yorkshire Ry*, on emploie une double rangée de tirants longitudinaux parallèles à l'axe de la chaudière, complétés par d'autres tirants obliques à têtes de fourche (fig. 309).

Dans les chaudières du *Brighton*, la consolidation des fonds arrière est opérée à l'aide d'entretoises vissées, à leur extrémité antérieure, dans les poutrelles du ciel, placées en long (fig. 347) (1).

Parfois, on se dispense totalement des tirants parallèles à l'axe et on se contente de tirants obliques terminés à leurs deux extrémités par les fourches embrassant d'une part un ou plusieurs fers à T rivés intérieure-

ment à la façade et, d'autre part, des pattes rivées au corps cylindrique ou au berceau de la boîte à feu ; des boulons, passés dans les œils de ces fourches, les relient aux pattes d'attache. C'est la disposition la plus fréquemment usitée aux Etats-Unis (fig. 219, 320). Dans la disposition de la

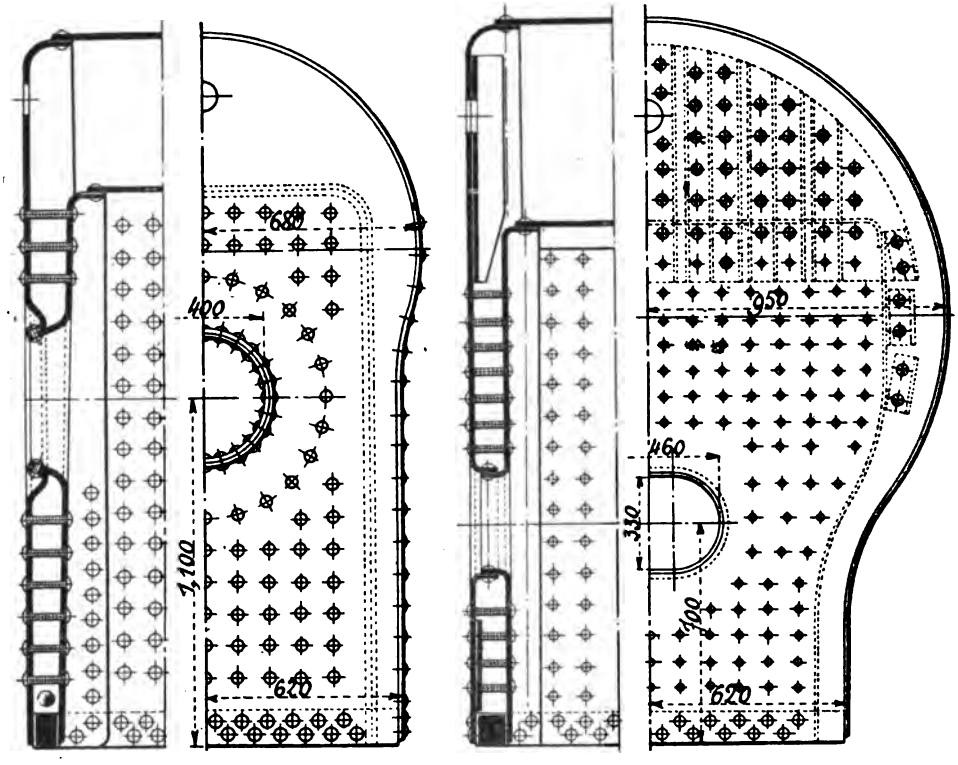


Fig. 335. — Dispositions américaines ayant pour but de remplacer, par l'assemblage de pinces embouties, le cadre de la porte du foyer.

figure 316 les tirants, du côté de la façade, ne se terminent pas par une fourche, mais simplement par un œil placé entre deux cornières voisines remplaçant le fer T dont nous avons parlé plus haut. Ces tirants obliques, avec attache par des axes, sont certainement de construction simple et économique, mais ils nous semblent défectueux. Il est difficile de les établir avec une exactitude suffisante pour qu'ils donnent un serrage initial convenable, ou même pour qu'ils ne présentent pas de jeu. Ce jeu augmente à la longue par suite du fouettement des tirants sous l'action des trépidations.

Il est incontestablement plus simple, comme il est d'usage sur presque tout le continent européen, d'utiliser le corps cylindrique lui-même comme tirant. Avec les foyers Crampton ou peu renflés, on raidit le fond à l'aide de cornières transversales adossées ou de tôles embouties rivées et reliées elles-mêmes par des goussets ou des pinces à l'enveloppe sur le côté de la boîte

à feu (fig. 336, 337) ou même vers le haut. Une seule de ces tôles ou une rangée de cornières adossées suffit, quand le ciel du foyer est placé un peu

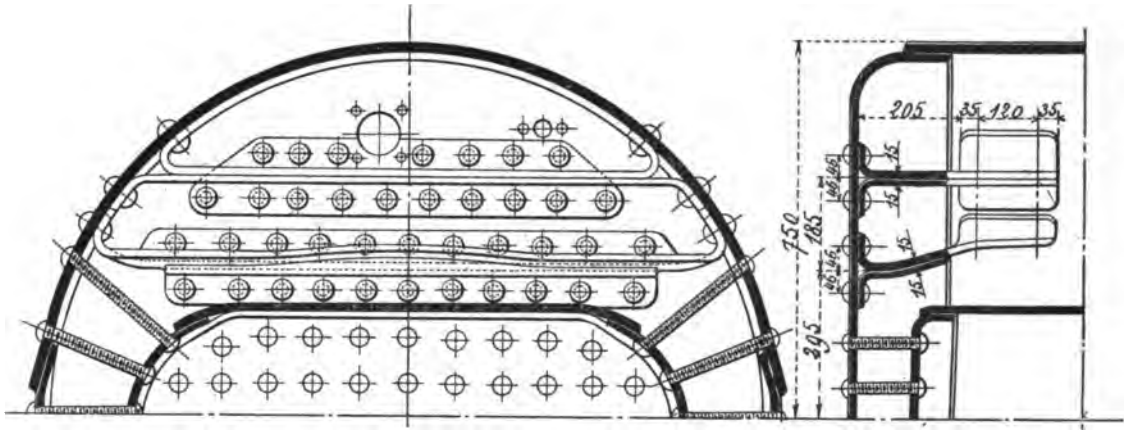


Fig. 336. — Consolidation de la partie supérieure de la face arrière par des poutrelles transversales (*Est*, Mach. 3001-3015).

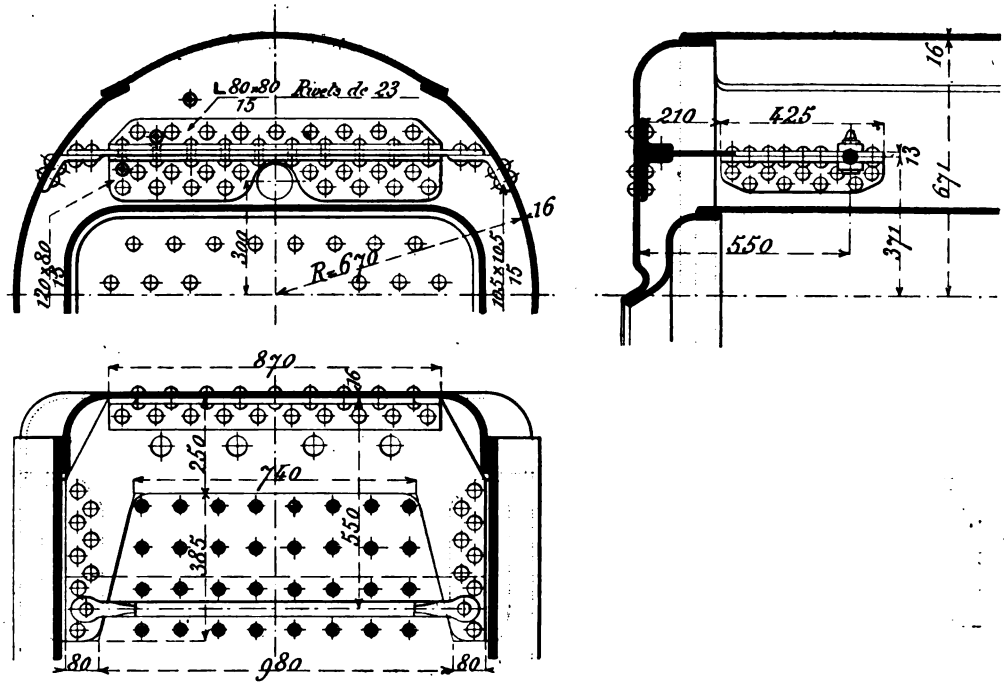


Fig. 337. — Consolidation de la partie supérieure de la face arrière de la chaudière (*État prussien*).

haut ou quand le rayon de l'arrondi de la façade est grand; dans les autres cas, il en faut deux et quelquefois trois avec les boîtes à feu renflées.

Dans les foyers Belpaire, on consolide les fonds comme plus haut à l'aide

de tôles placées horizontalement et rivées à la façade par des pinces relevées, disposées suivant deux ou trois groupes selon l'importance de la machine et la hauteur de la chambre de vapeur, mais on ne peut plus, comme ci-dessus, les relier directement par des goussets à l'enveloppe de la boîte à feu parce que celle-ci, dans la partie haute, est rattachée au corps cylindrique par des parties embouties qui ne présentent pas une rigidité suffisante et pourraient se déformer sous l'action des efforts longitudinaux. On est obligé de revenir à l'emploi des tirants, mais on limite leur longueur à celle de la boîte à feu. Ces tirants, parallèles à l'axe de la chaudière, sont boulonnés sur des pattes de formes diverses rivées à l'intérieur de la première virole du corps cylindrique, immédiatement à l'avant de la clouure de fixation sur la façade avant (fig. 324, 367). Ces tirants sont généralement au nombre de huit et disposés symétriquement de part et d'autre du plan vertical médian de la chaudière.

Nous attirons l'attention sur la disposition simple et ingénieuse adoptée par M. de Glehn pour les chaudières des nouvelles express compound du *Nord* ou du *Midi* et qui s'explique d'elle-même (fig. 321, 323, 368) ; elle permet de n'employer en tout que deux tirants.

194. Entretoises. — Les parois planes et sensiblement parallèles du foyer et de son enveloppe, sur les côtés et sur les faces avant et arrière, ne pourraient résister à l'action de la pression qui tend à les séparer si elles n'étaient solidement reliées entre elles. Cette liaison est effectuée au moyen d'entretoises vissées dans les deux plaques et peu espacées.

Les parois de l'enveloppe extérieure et du foyer n'étant pas rigoureusement parallèles, du moins sur toute leur longueur, pour éviter une obliquité excessive des entretoises sur une des tôles, on partage également leur inclinaison de manière qu'elles fassent le même angle avec chacune d'elles.

Les entretoises, dont la direction est sensiblement perpendiculaire aux parois du foyer, ne s'opposent pas aux légers mouvements de dilatation et de contraction ; celles de la partie supérieure ayant à subir du fait de cette dilatation qui s'opère vers le haut (la plaque du foyer et l'enveloppe étant fixées entre elles vers le bas, sur le cadre) des déplacements angulaires un peu plus grands, il est bon qu'elles offrent plus de longueur ; c'est une des raisons pour lesquelles on doit élargir les lames d'eau vers le haut. Pour le même motif, on doit s'arranger, autant que possible, pour que les arrondis formant le raccord entre le ciel et les côtés soient parfaitement circulaires et puissent résister par eux-mêmes à la pression extérieure. Les entretoises que l'on place dans cette partie sont en effet exposées à se casser par suite de leur position très oblique (environ 45°) ; elles forment arcs-boutants et s'opposent à la dilatation du foyer.

Ces entretoises sont toujours en cuivre laminé sauf pour les chaudières

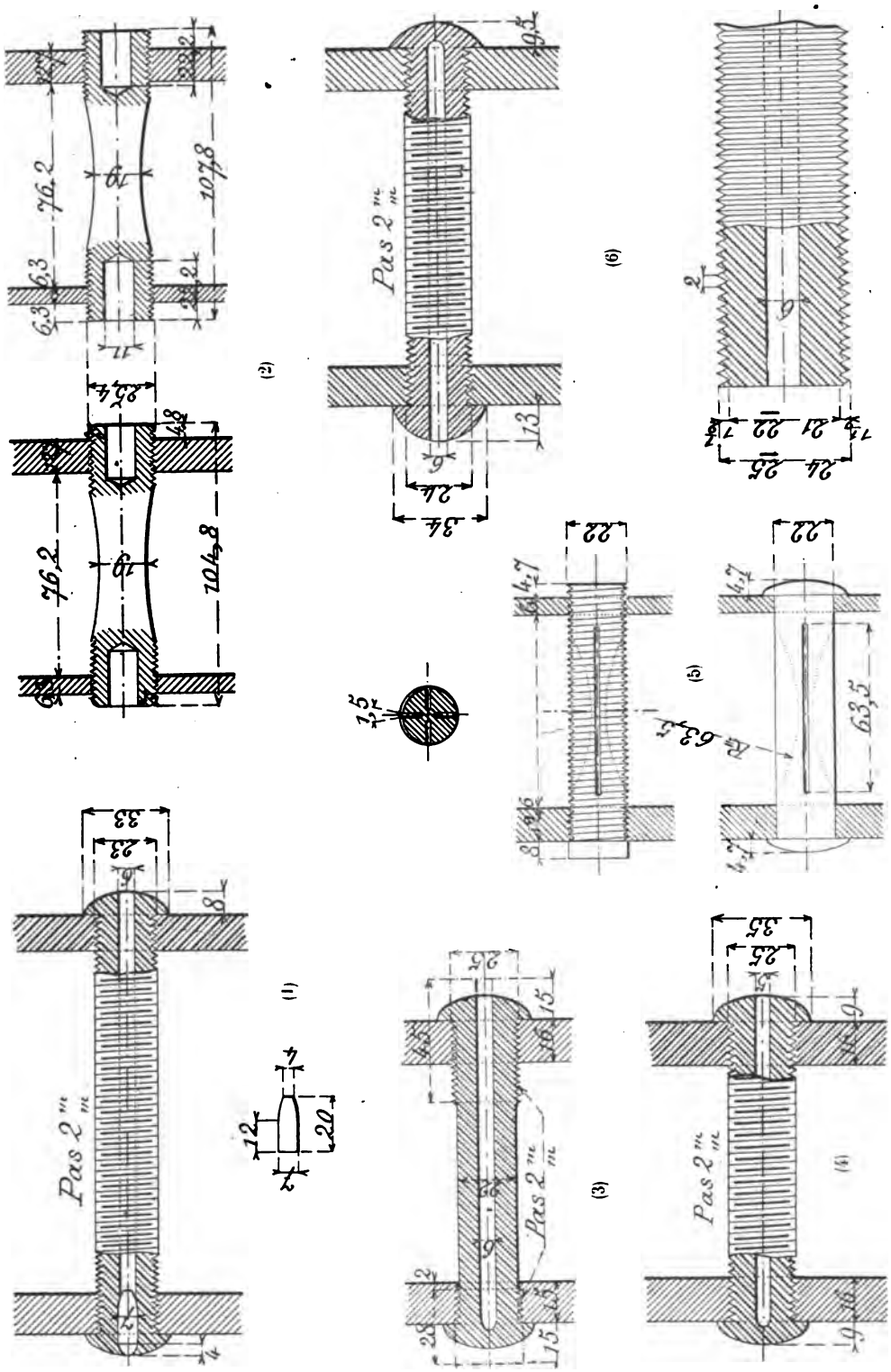


Fig. 338. — Types divers d'entretoises en cuivre : (1) *P.-L.-M.*; (2) *North London* ; (3) *Nord* (Mach. 2160) ; (4) *Est* ; (5) *Great Eastern* ; (6) *Ouest*.

ayant des foyers en acier; on trouvera plus haut les prescriptions de quelques Compagnies et administrations relatives à la fourniture des barres pour entretoises. Le cuivre est le métal qui convient le mieux dans la circonstance; le fer ou l'acier doux, si malléables qu'ils puissent être, ne se prêteraient pas aussi bien à la rivure à froid, que la présence du filetage rend indispensable, et se détruiraient plus rapidement au feu.

Dans les locomotives appartenant aux Compagnies françaises, les entretoises sont cylindriques, filetées sur toute leur longueur, et rivées une fois en place, à leurs deux extrémités. Elles sont percées de part en part, suivant leur axe, d'un trou dans le diamètre varie de 4 mm. (*Midi*), à 5 mm. (*Nord*) et 6 mm. (*Ouest*, *Etat*, *P.-L.-M.*, *P.-O.*, *Est*, fig. 338).

Le diamètre de ces entretoises est ordinairement de 24 à 25 mm. et leur espacement d'axe en axe de 90 à 100 mm. Quelques Compagnies font varier le diamètre des entretoises avec le timbre de la chaudière; ainsi, la *Compagnie d'Orléans* a mis en vigueur la règle suivante : Le diamètre des entretoises est de 23 mm. pour les chaudières timbrées à moins de 10 kg., de 24 mm. pour le timbre de 10 kg., de 25 mm. pour celui de 11 kg., de 27 mm. pour celui de 12 kg., de 28 mm. pour celui de 13 kg. et de 30 mm. pour celui de 15 kg.

La distribution des entretoises doit se faire avec soin pour éviter toute fatigue de celles-ci ou des plaques. On a parfois tendance à en placer dans les régions où elles ne sont nullement utiles, par exemple trop près des parties embouties, des clouures ou du cadre soit du foyer soit de la porte ; elles ne sont bonnes dans ces points qu'à préparer des nids où le tartre vient se loger.

Le trou percé suivant l'axe a pour but de révéler par la fuite de vapeur à laquelle il donne alors naissance, les ruptures d'entretoises avant qu'il se produise de déformation des parois, la rupture d'une entretoise pouvant, par la surcharge qu'elle impose aux entretoises voisines, occasionner de proche en proche d'autres cassures ayant pour résultat un capitonnage ou même dans certains cas la déchirure des parois. Certaines administrations (*Midi*) font déboucher ce trou des deux côtés, au dehors et à l'intérieur du foyer; d'autres oblitèrent le trou d'un côté, soit par le rivetage, soit au moyen d'une olive en fer (*P.-L.-M.*), et le font déboucher à l'extérieur de la boîte à feu (*P.-O.*), d'autres le bouchent du côté du foyer (*Est*, *Nord*, *P.-L.-M.*). Cette dernière pratique semble préférable parce que l'on peut se rendre compte à première vue, sans démonter la tôle d'enveloppe de la boîte à feu, de la position exacte qu'occupe l'entretoise brisée. D'autre part, la fuite produite dans le foyer peut entraîner une détresse en cours de route.

Comme les ruptures d'entretoises sont dues, dans l'immense majorité des cas, aux légers déplacements angulaires et aux flexions auxquels elles sont

soumises par suite des effets de dilatation et de contraction des parois du foyer, elles se produisent presque toujours dans la partie voisine des plaques, il suffit à la rigueur de forer les entretoises à leurs deux extrémités, sur une longueur de 20 à 30 mm., comme cela se pratique sur beaucoup de réseaux étrangers où pour faciliter la mise en place et le démontage des entretoises, on supprime en outre les filets dans la partie intermédiaire en donnant en ce point, au corps, un diamètre un peu moindre. Cette pratique commence à s'introduire en France; on en trouvera un exemple dans les entretoises des chaudières des nouvelles locomotives express compound construites par la Société alsacienne pour la *Compagnie du Nord* (fig. 338).

Ordinairement, on met en place les entretoises en se servant d'une clé qui s'emmanche autour d'un carré, ménagé sur l'extrémité extérieure et qu'il faut ensuite venir couper avant d'opérer le rivetage. Dans quelques ateliers on se dispense de ce petit travail supplémentaire ; l'ouvrier fait tourner l'entretoise, pour la poser, à l'aide d'une douille filetée taraudée, prenant les derniers filets et butant sur le bout extérieur de l'entretoise. Cette pratique est générale en Angleterre.

Dans certains ateliers, les entretoises sont vissées mécaniquement au moyen d'un flexible ou d'une transmission spéciale. Quelques Compagnies pensent au contraire que le vissage à la main est le seul moyen de s'assurer qu'elles ont un serrage convenable ; on peut d'ailleurs, quel que soit le mode de pose, par un sondage rapide et facile, s'assurer qu'il en est bien ainsi.

Dans les locomotives de la *Compagnie de l'Ouest*, le diamètre et l'écartement des entretoises sont comme suit dans les principaux types de chaudières :

DÉSIGNATION DES MACHINES	621 à 635	951 à 952	963 à 990	3561 à 3572	2260 à 2269	2301 à 2304
Ecartement des rangées verticales . . . mm.	90,5	100	100	99	101	88
Ecartement des rangées horizontales . . —	96	96	95	99	96	88
Diamètre des entretoises. . . . . —	23	25	25	23	25	25
Timbre de la chaudière . . . . . kg.	10	11	12	10	10	12

Les prescriptions de la *Compagnie de Lyon* relativement à la confection et à la pose des entretoises sont les suivantes :

Les entretoises en cuivre sont coupées dans des barres de 23 mm. de diamètre à une longueur égale à l'écartement extérieur des plaques qu'elles doivent réunir, augmenté de 20 mm. ; elles sont bien dressées puis percées à la mèche, sur toute leur longueur, d'un trou bien centré de 6 mm. de dia-

mètre; elles sont filetées ou taraudées par filières à couteaux coupants, sur toute la longueur.

Les plaques à entretoiser sont percées au foret, puis taraudées de manière qu'elles fassent pour ainsi dire partie d'un même écrou dont la partie correspondant à leur intervalle aurait été enlevée.

Les entretoises sont ensuite vissées sans aucun jeu et de manière que leurs extrémités dépassent de 10 mm. la surface des plaques; on les bouche par l'extérieur à l'aide d'un bouchon conique en fer de 6,5 mm. à 7 mm. de diamètre maximum; on les rive ensuite aux deux extrémités de manière à former des têtes exactement conformes aux dessins.

En Angleterre, on emploie fréquemment des entretoises filetées sur toute leur longueur comme chez nous, et rivées aux deux bouts, mais on ne les perce jamais sur toute leur longueur. On leur donne un diamètre de 19 à 25 mm. et on les espace de 95 à 102 mm. Au *Great Eastern*, les extrémités sont seules filetées; elles ont un diamètre extérieur de 25,4 mm. qui se réduit à 19 mm. au milieu. Les extrémités des entretoises sont percées d'un trou de 11 mm. de diamètre et de 20 mm. de profondeur; elles ne sont pas rivées. Pour les foyers en acier employés sur une quarantaine de machines à marchandises de la même Compagnie, on emploie des entretoises d'un type spécial représenté figure 338 (5).

Le *North London* emploie des entretoises d'un type particulier (fig. 338) (2) dont on paraît très satisfait, mais qui ne s'est pas répandu en dehors des ateliers de cette Compagnie. Le corps est tourné à un diamètre de 19 mm.; les extrémités, qui sont seules filetées, ont 25 mm.; elles sont percées aux deux bouts, d'un trou de 11 mm. de diamètre et de 28 mm. de profondeur à l'intérieur duquel on force à coups de marteau, après la mise en place de l'entretoise, un outil conique qui ouvre très légèrement l'extrémité de l'entretoise et exerce sur le filetage un serrage énergique dispensant du rivetage.

A l'*État belge*, les entretoises, en cuivre, sont espacées de 100 mm. et ont un diamètre de 25 mm.; elles sont évidées dans la partie non en contact avec les tôles.

Aux Chemins de fer *Méridionaux* (*Italie*), les extrémités des entretoises seules sont filetées, les filets sont enlevés dans la partie non en contact avec les tôles; elles sont rivées à leurs deux extrémités et perforées suivant toute leur longueur.

En Suisse, en Allemagne, en Russie, on a l'habitude d'évider les entretoises dans la partie intermédiaire.

On prescrit ordinairement que les entretoises doivent être vissées sans aucun jeu dans les plaques et on doit, une fois qu'elles sont posées, mais avant la rivure, vérifier qu'il en est ainsi, en frappant de côté avec un marteau léger, l'extrémité restée libre; toute entretoise qui branle, même légèrement,

doit être changée. Toutefois, cette raideur des entretoises, favorable à leur étanchéité, ne l'est pas à leur durée et les ruptures sont d'autant plus fréquentes que les entretoises sont plus serrées. Pour éviter ces cassures dues aux déplacements angulaires des entretoises, sous l'action du mouvement ascensionnel du foyer quand il se dilate au début du chauffage, le *Pensylvania Railroad* emploie, depuis quelques années, des entretoises spéciales du système Nixon, représentées figure 399. L'entretoise, au lieu d'être montée directement sur la tôle d'enveloppe, est vissée dans un bouchon en bronze ou en fonte malléable vissé lui-même dans la plaque. Le trou de ce bouchon, dans lequel l'entretoise se visse, est conique, de manière qu'il n'y ait qu'un très petit nombre de filets en prise, ce qui permet à l'entretoise de prendre sans casser une certaine obliquité, obliquité d'ailleurs diminuée par ce fait que l'entretoise se trouve allongée. On adopte ce système pour les rangées supérieures, qui souffrent plus que les autres de l'effet des dilatations, et aux divers points du foyer où les roues et les longerons le permettent. Ce dispositif a, paraît-il, supprimé les ruptures d'entretoises, mais il est coûteux et double le nombre des parties filetées dans les côtés du foyer ainsi par conséquent que les chances de fuite.

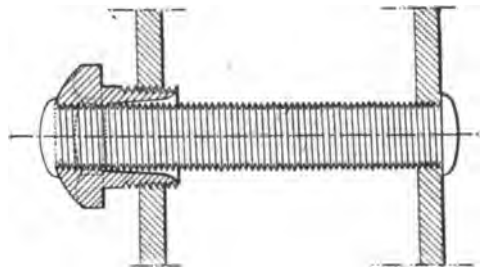


Fig. 339. — Entretoise permettant la dilatation verticale du foyer; appliquée par le *Pensylvania Railroad.*

195. Tirants de la plaque tubulaire du foyer. — La plaque tubulaire du foyer est armaturée, dans la partie basse, par les entretoises qui la lient à l'enveloppe, dans la partie haute, par le faisceau tubulaire qui la rattache à la plaque tubulaire avant pressée par la vapeur dans la direction opposée. L'adhérence des tubes, à l'intérieur des trous des plaques, est plus que suffisante pour qu'ils puissent jouer ce rôle d'entretoises. Cependant, au *Caledonian Ry*, on place, au milieu du faisceau tubulaire, deux ou trois tirants ordinaires, réglables, qui relient les deux plaques tubulaires (fig. 315); il est vrai que, dans les machines de cette Compagnie, les tubes, en vue d'éviter les effets de dilatation, sont légèrement cintrés et on peut craindre qu'ils possèdent une élasticité trop grande pour servir efficacement d'entretoises.

Entre le bas du faisceau tubulaire et la rangée supérieure d'entretoises, la plaque tubulaire est abandonnée. On pourrait craindre un affaissement en ce point, si l'on n'y plaçait des consolidations spéciales sous forme de tirants reliés à la tonne. Ceux-ci, que l'on peut voir sur les plans d'ensemble et

figure 341, sont disposés en demi-cercle, suivant le contour du corps cylindrique et sont au nombre de six à huit placés symétriquement par rapport à l'axe vertical de la chaudière.

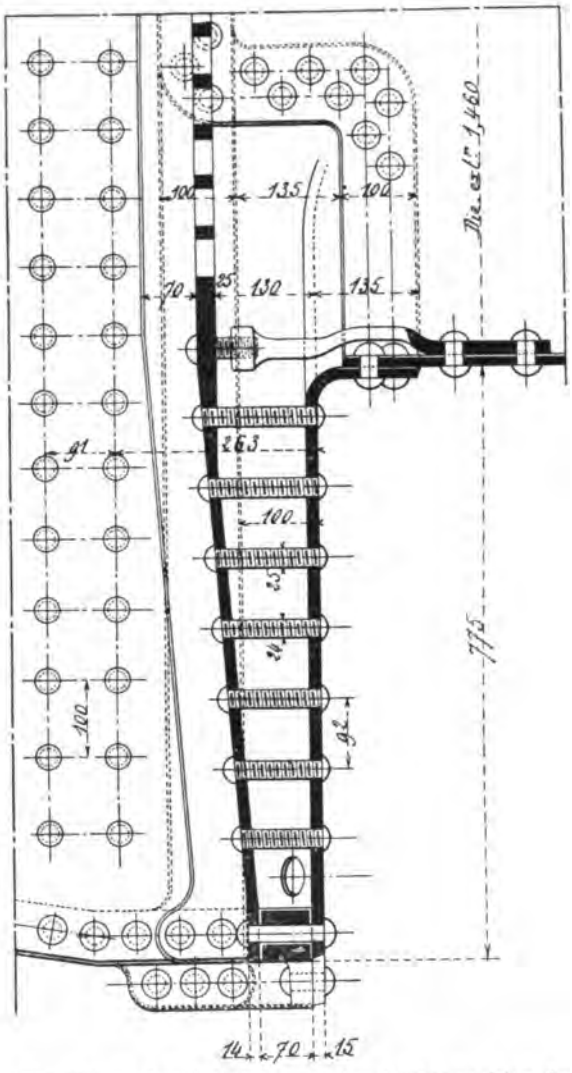


Fig. 340. — Avant du foyer montrant la disposition du cadre, de la plaque avant, des entretoises et de l'agrafage.

On trouvera figure 341 trois formes usuelles de ces tirants. Les agrafes en fer forgé, fixées sur l'intérieur de la virole arrière par deux ou trois rivets et dirigées parallèlement à l'axe de la chaudière, reçoivent, à leur extrémité postérieure, une vis en cuivre rouge traversant la plaque tubulaire et dont la tête est rivée du côté intérieur du foyer. Cette vis, comme les entretoises, est parfois forée en son centre, le trou se trouvant bouché du côté de la chaudière, l'injection de l'eau qui se fait à l'intérieur de la boîte à feu en cas de rupture de cette vis, avertit le mécanicien de cet accident.

Certains constructeurs disposent l'agrafe de telle sorte que le serrage de la vis vienne y faire appliquer la plaque, l'étanchéité est ainsi plus facile à obtenir (fig. 341) (2) (3) d'autres au contraire, pour donner au système un peu plus d'élasticité, ne font pas porter la plaque sur l'agrafe (fig. 341) (4).

Le tirant est fixé à la tonne par deux ou trois rivets disposés soit en long comme figure 341 (2) (4), soit en travers comme figure 341 (3). Ces tirants doivent être évidés à leur partie inférieure ou cintrés vers le haut, afin d'éviter les têtes des rivets de la première clouure du corps cylindrique.

On trouvera figure 342 la disposition adoptée par le *North Eastern Ry*. La plaque ne s'applique pas sur l'agrafe ; la vis a un plus grand diamètre dans

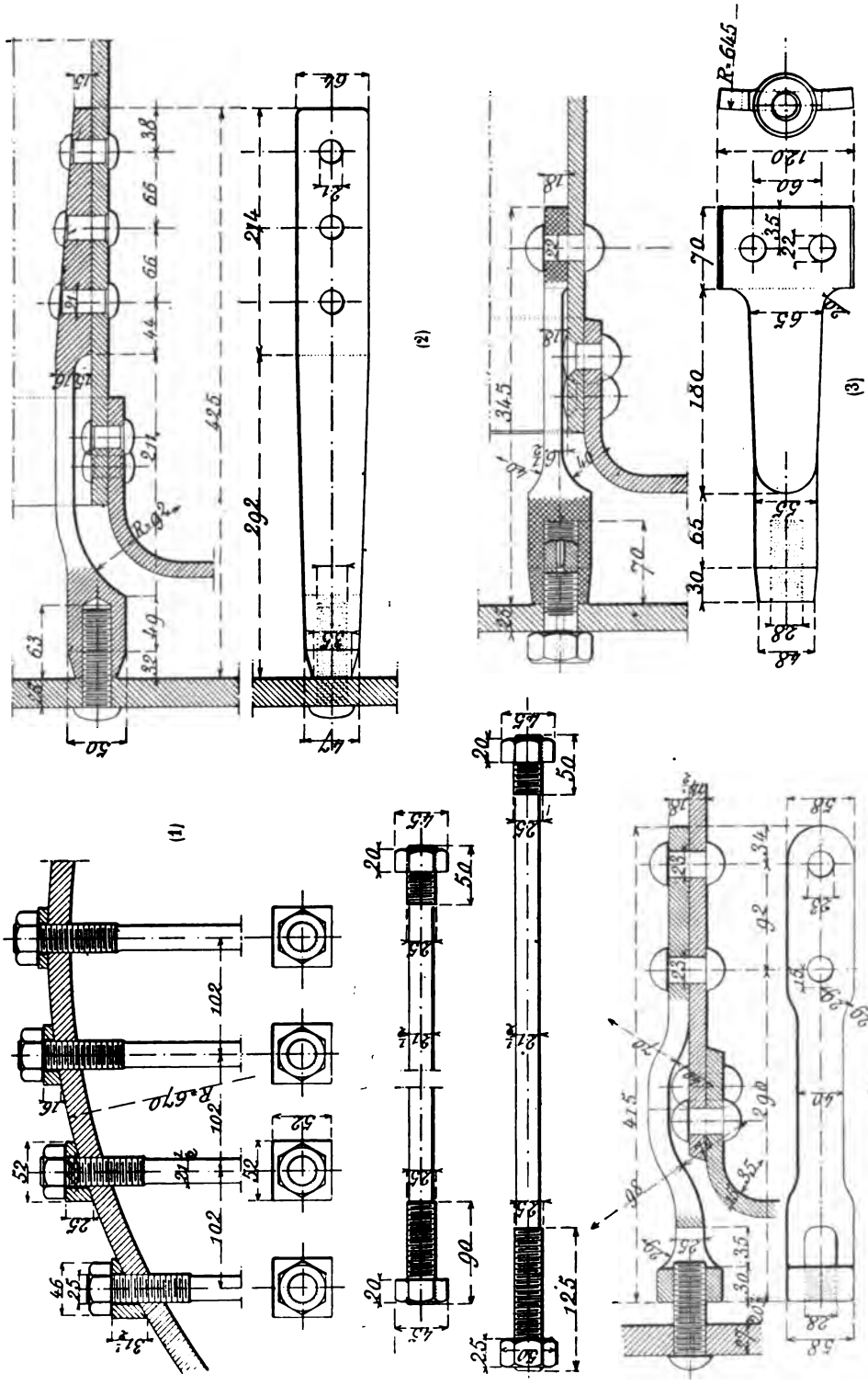


Fig. 241. — (1) Disposition des tirants verticaux de ciel de foyer dans une boite à feu Crampton. *Est*; (2 à 4) agrafes de la plaque tubulaire du foyer sur le corps cylindrique : *État belge*; *P.-L.-M*; *Est*.

la partie qui traverse la plaque tubulaire sur laquelle elle s'applique par l'intermédiaire d'une rondelle en cuivre ; elle n'est pas rivée et porte un carré du côté du foyer.

Quand la dernière rangée inférieure des tubes est placée très bas et que la rangée supérieure des entretoises peut être remontée aussi près que possible du coin de la boîte à feu, on peut à la rigueur se dispenser de ces tirants, c'est ce qu'ont fait les ingénieurs du *Great Western Ry* dans la chaudière, représentée figure 317.

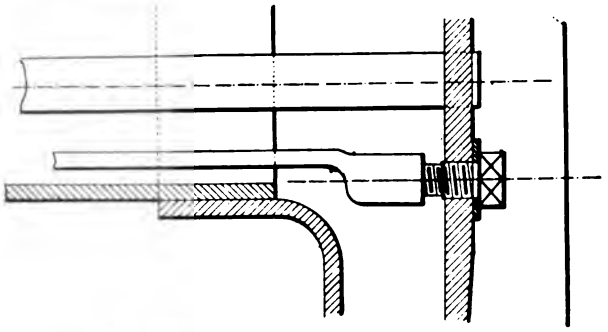


Fig. 342. — Agrafe de la plaque tubulaire (*North Eastern Railway*).

196. Consolidation des ciels de foyers. — Le ciel du foyer forme une surface plate relativement très étendue et qui, étant donnée la faible épaisseur de la plaque qui le constitue, ne présente par lui-même qu'une résistance insignifiante par comparaison avec la charge extrêmement considérable à laquelle il est soumis de la part de la vapeur. Un ciel de foyer mesurant 2,00 m. de longueur et 1,00 m. de largeur, dans une chaudière timbrée à la pression aujourd'hui fréquente de 13 kg., supporte une charge totale de 260 tonnes sous laquelle il s'aplatirait instantanément s'il n'était solidement consolidé.

Cette rigidité, qui manque au ciel lui-même, on la demande à un système d'armatures composé de poutrelles transversales ou longitudinales ou de tirants fixés au berceau à leur extrémité supérieure.

Les différents modes de consolidation adoptés pour les ciels de foyers de locomotives se rapportent aux types ci-dessous :

(*a*) *Poutrelles longitudinales* { *Non supportées ;*
(*b*) *Poutrelles transversales* { *Supportées ou suspendues.*
(*c*) *Tirants articulés.*
(*d*) *Tirants vissés.*
(*e*) *Armaturage direct.*

L'étude de ces différents procédés de consolidation présente un grand intérêt et, de leur bonne disposition, dépend en grande partie la durée des foyers.

197. Consolidation par poutrelles. — On place sur le ciel du foyer, perpendiculairement à l'un de ses axes, un certain nombre de poutrelles ou *fermes*, en fer ou en acier, affectant à leur partie supérieure pour plus de

légèreté, la forme d'un solide d'égale résistance, reliées au ciel du foyer par des vis ou des boulons et reposant sur les deux faces verticales opposées du foyer (fig. 343).

Jusqu'il y a peu d'années, on constituait chacune de ces fermes de deux flasques parallèles et voisines, en fer forgé ou en tôle découpée, sur lesquelles la charge du foyer était reportée au moyen de boulons verticaux pas-

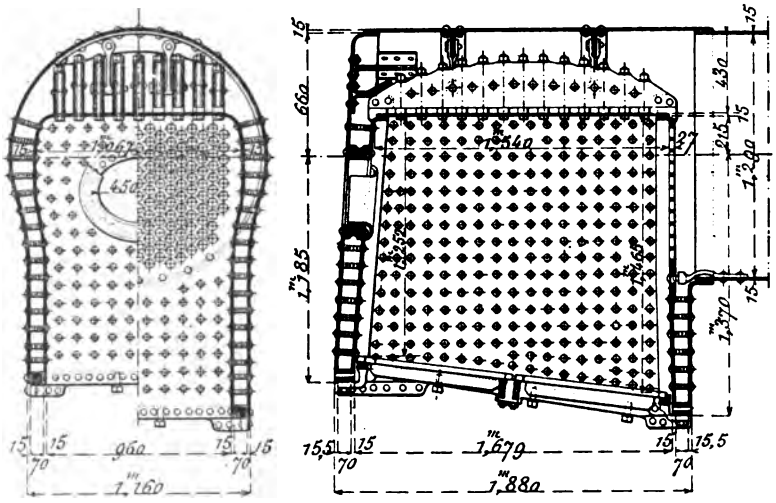


Fig. 343. — Foyer avec fermes longitudinales, supportées.

sant entre elles. Ces fermes étaient évidées à leur partie inférieure pour faciliter le dégagement de la vapeur ou la circulation de l'eau ; elles ne venaient en contact avec la partie supérieure du ciel que par des portées rabotées et dressées, de faible surface, qui se trouvaient disposées de part et d'autre de chaque boulon (fig. 344). Les boulons traversaient le ciel dans lequel ils étaient vissés et transmettaient la charge aux fermes à l'aide d'écrous, vissés à leur extrémité supérieure, reposant sur une petite traverse munie de deux talons embrassant les deux fermes contiguës et portant sur des parties de même largeur, dressées. Ces fermes, pour qu'elles ne puissent s'écarter et se séparer, étaient reliées, entre chacun des boulons d'attache sur le ciel, par un petit rivet traversant une cale en fer interposée entre les deux flasques. Les extrémités des fermes étaient articulées sur des platines dressées reposant sur les arrondis des coins supérieurs du foyer dont elles épousaient la forme et qui, plus larges que les poutrelles, ne risquaient pas d'entamer et de couper le métal.

Les écrous des boulons étaient serrés à refus sur les bossages des fermes et le tout constituait un assemblage solide, mais assez complexe et coûteux. Dans la suite, on a simplifié les fermes en les formant comme on le voit

figures 351 et 352 d'une flasque simple dont l'épaisseur, plus grande devait être suffisante pour permettre le logement des vis de fixation sur le ciel remplaçant dès lors les boulons. Comme leur partie supérieure n'avait pas à satisfaire à ce desideratum, quelques constructeurs, pour alléger les poutrelles, les

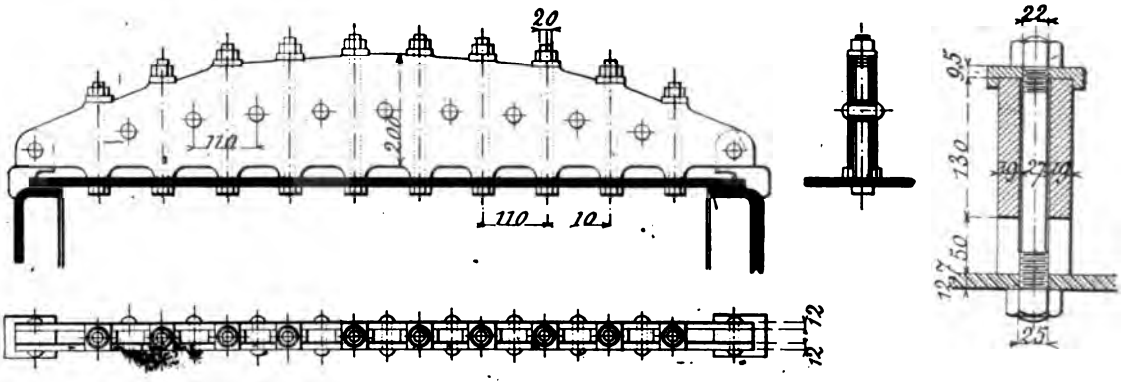


Fig. 344. — Type de ferme ordinaire à deux flasques, non suspendue (*Midi*).

amincissent à la forge dans le haut (fig. 346) (2). Depuis quelques années, en Angleterre, on ne fait plus les fermes qu'en acier moulé ; on peut alors leur

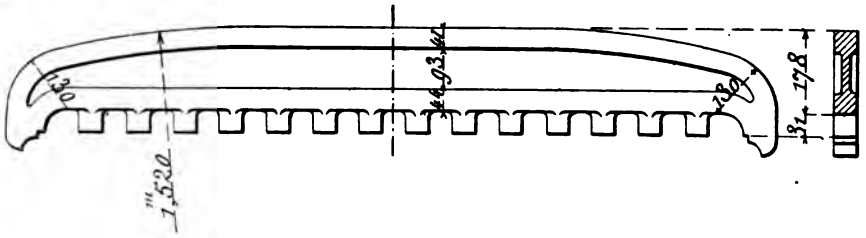


Fig. 345. — Ferme en acier moulé (*Great Eastern Railway*).

donner de fonte, sans travail d'outil, une section à I qui les allège notablement. Les bossages recevant les vis sont alors cylindriques (fig. 345).

Les poutrelles à simple flasque présentent une largeur totale inférieure à celle des fermes doubles (40 à 50 mm. au lieu de 60 à 70), ce qui est favorable au point de vue de la vaporisation, le ciel étant plus dégagé. L'espace libre réservé entre les deux flasques se remplit au bout de peu de temps d'incrustations, qui empêchent le dégagement des bulles de vapeur entre elles.

Dans les anciennes machines construites en Europe, les fermes étaient disposées dans le sens de la longueur et reposaient d'une part sur la plaque arrière et, de l'autre, sur la plaque tubulaire. Cette disposition était nécessitée par la présence, dans les chaudières étudiées à cette époque, de tirants longitudinaux de consolidation reliant les deux fonds, mais elle n'était pas sans inconvénients. La plaque tubulaire, malgré sa plus grande épaisseur, présente

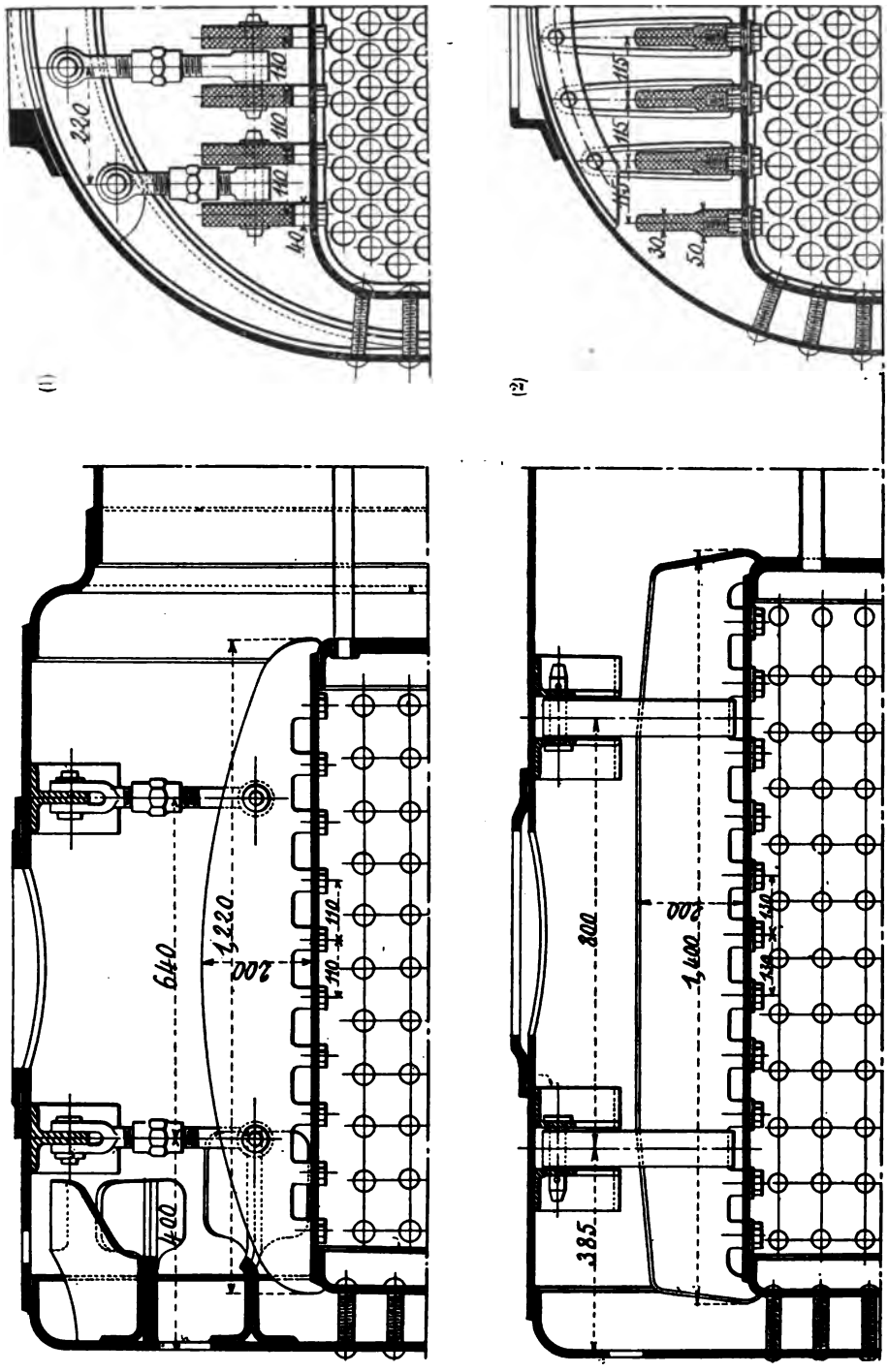


Fig. 346. — Types de consolidation du ciel de foyer par fermes longitudinales suspendues :
(1) *Chemins de fer de l'Ouest* ; machines du type 2 000, suspension des fermes par tirants réglables ; (2) *North London Railway* ; suspension des fermes par étriers.

une résistance verticale plus faible que les flancs à cause des nombreux trous de tubes qui la découpent. On constatait, sous l'action de la charge reportée

par les fermes sur ces plaques, des fissures et des ovalisations des trous. Ce système, en outre, s'adaptait mal à l'allongement du foyer nécessité par l'accroissement de puissance des machines ; l'augmentation de la charge et de la longueur des fermes entraînait à leur donner une hauteur de plus en plus grande. On fut ainsi amené à les placer transversalement, ou, quand la disposition des armatures des fonds ne le permettait pas, à les suspendre à l'enveloppe.

En plaçant les fermes en travers, on les rendait indépendantes de la longueur des foyers ; quand celle-ci augmentait, il suffisait d'accroître leur nombre. Aussi les Américains qui, depuis longtemps ont éprouvé la nécessité d'employer des foyers de grande longueur, ont-ils été les premiers à recourir à ce dispositif. Les fermes en travers conservent cet avantage même quand elles sont supportées, le seul inconvénient qu'elles puissent présenter consiste à s'opposer au passage de tirants longitudinaux quand il y en a et à obliger de relever la tringle de manœuvre du régulateur quand elle est intérieure. C'est pour cette raison que les ingénieurs anglais, qui d'ailleurs n'ont pas encore construit, si ce n'est pour les colonies, de foyers ayant plus de 2,00 m. de longueur intérieure, sont jusqu'ici restés fidèles aux fermes en long.

Avec les pressions usitées aujourd'hui, il est nécessaire de relier les fermes à l'enveloppe du foyer de manière à décharger les côtés de celui-ci des efforts verticaux considérables dus à l'action de la vapeur sur le ciel. Cette charge est supportée par le cadre du foyer et les rivets qui l'unissent aux plaques intérieures et extérieures, les premières, qui travaillent à la compression, se voileraient si elles n'étaient armées par les entretoises qui les relient aux tôles d'enveloppe. Il se produit néanmoins une fatigue de tout l'ensemble et il paraît plus rationnel, de relier directement les poutrelles au berceau en supprimant ainsi tous les efforts verticaux et de signes contraires auxquels sont soumises les parois du foyer et de son enveloppe quand les fermes sont libres.

Quand les poutrelles sont reliées au berceau de la boîte à feu, elles ne servent plus pour ainsi dire qu'à diminuer le nombre des tirants et à répartir uniformément l'effort sur toute la longueur du ciel. Elles comportent néanmoins, à leurs extrémités, des portées qui viennent reposer sur les arrondis formant les coins du ciel au cas où, le foyer se trouvant soulevé par l'effet de sa dilatation, les bielles de suspension n'agiraient plus. Ces portées doivent avoir une large surface sous peine de s'incruster peu à peu dans le cuivre du ciel et d'y déterminer des zones de rupture. Dans les chaudière Flaman de la *Compagnie de l'Est*, le ciel, en raison de la hauteur des parois, est rapporté, et les fermes viennent s'appliquer directement de part et d'autre, sur l'arête supérieure des côtés (fig. 354).

La liaison des fermes au berceau doit être opérée de manière à prévenir

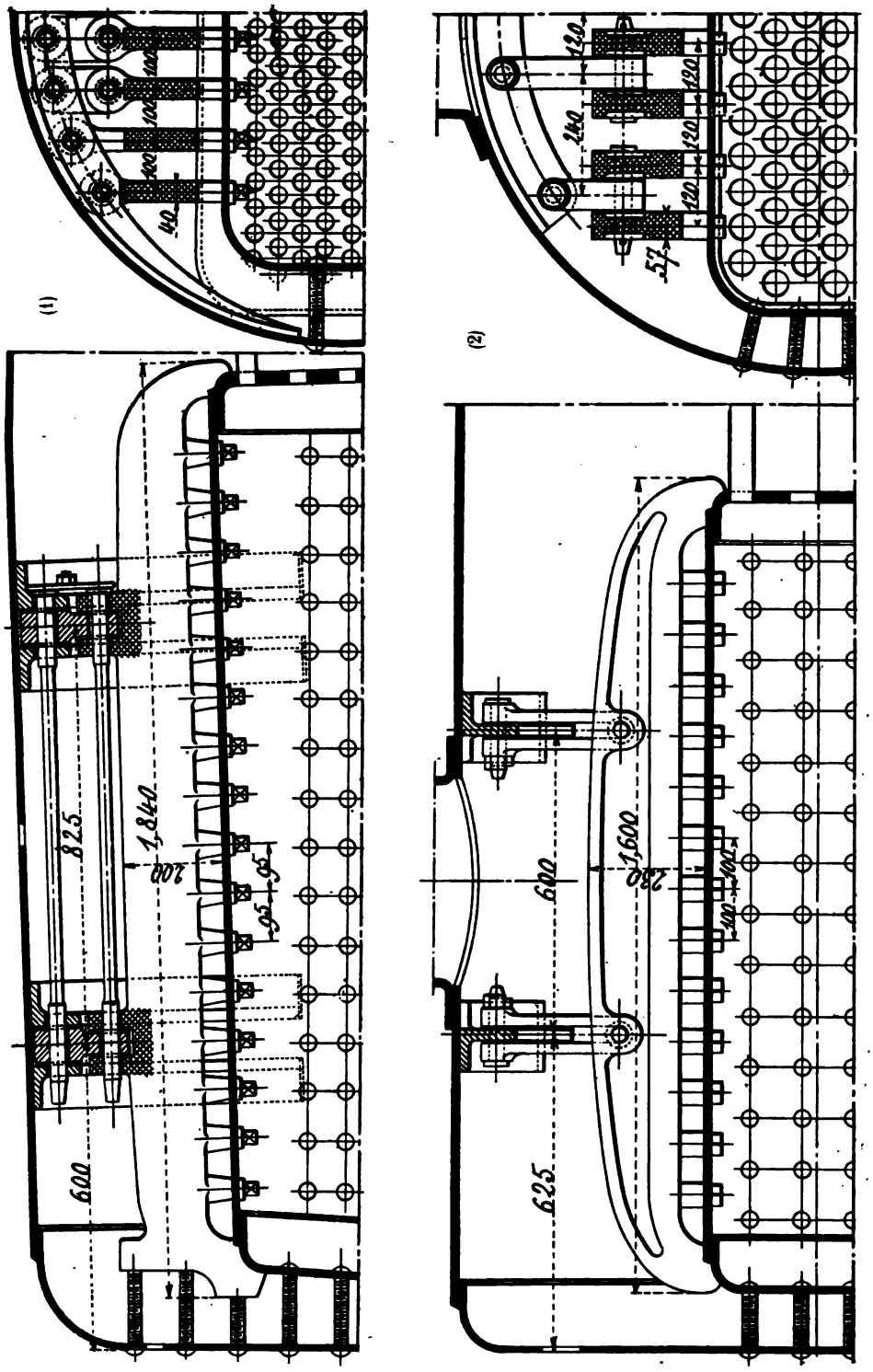


Fig. 347. — Types de consolidation du ciel du foyer par fermes longitudinales suspendues :
(1) *London Brighton Railway* (machines du type *Gladstone*) ; fermes en fer forgé ; (2) *Great Eastern Railway* ; fermes en acier moulé.

tout affaissement du ciel, mais à ne pas s'opposer à son soulèvement pour permettre sa dilatation. C'est là une question très importante dont la solution est plus facile avec les fermes qu'avec les consolidations par tirants et qui est la principale cause de leur succès.

Dans les premiers moments de l'allumage, le foyer, surtout s'il est en cuivre, se dilate rapidement sous l'action du feu, tandis que l'enveloppe, qui est en fer ou en acier et ne s'échauffe que graduellement en suivant les températures de la masse d'eau, se dilate beaucoup moins et plus lentement. Le foyer se soulève donc tout d'abord par rapport à l'enveloppe, il importe que ce soulèvement puisse se produire librement sous peine de créer dans les diverses parties du foyer et de son enveloppe ou dans les armatures qui les relient, des efforts anormaux qui se traduisent à la longue par des ruptures d'entretoises, de tirants, par l'ovalisation des trous de la plaque tubulaire, par le cintrage du ciel, etc.

D'autre part, s'il est nécessaire que le jeu des dilatations puisse s'opérer librement, il ne l'est pas moins que les organes mobiles de support disposés en vue de le permettre viennent, bien avant que la pression de régime soit atteinte, se retrouver en contact et établir la liaison rigide entre le ciel du foyer et l'enveloppe. Autrement, ce seraient les entretoises latérales qui supporteraient tout l'effort et, sous l'influence de la charge et des trépidations, il se produirait des ruptures.

La *Compagnie de l'Ouest* s'est livrée dans ses ateliers, en 1893, d'après les instructions de M. l'ingénieur en chef Clérault, à des expériences très intéressantes, ayant pour but de déterminer la nature et l'importance des dilatations relatives que subissent les diverses parties du foyer pendant la mise en pression[1]. Les expériences ont porté sur un foyer (machines express à bogie) dont le ciel est consolidé par des fermes placées en travers reposant librement, par leurs extrémités, sur des corbeaux rivés au berceau (fig. 352). Elles ont donné les résultats suivants.

Dès le début du chauffage, le ciel du foyer se soulève; les fermes quittent leurs corbeaux; l'intervalle qui les sépare va d'abord en croissant et atteint un maximum de 2 mm. à 2,5 mm. à une pression un peu inférieure à 1 kg. La pression de la vapeur sur le ciel du foyer retarde peu à peu le mouvement ascensionnel des fermes; à partir du moment où la pression atteint 6 kg., les fermes semblent rester stationnaires; la pression de la vapeur suffit alors à contre-balancer l'effet de la dilatation.

Toutefois, l'effort exercé par la pression de la vapeur ne produit pas l'affaissement du ciel du foyer, c'est-à-dire que jamais la variation ne devient négative.

[1] Expériences sur la dilatation des foyers de chaudières de machines locomotives, exécutées aux ateliers des chemins de fer de l'Ouest, note par M. Rondelet. *Revue générale des Chemins de fer*, numéro d'octobre 1893.

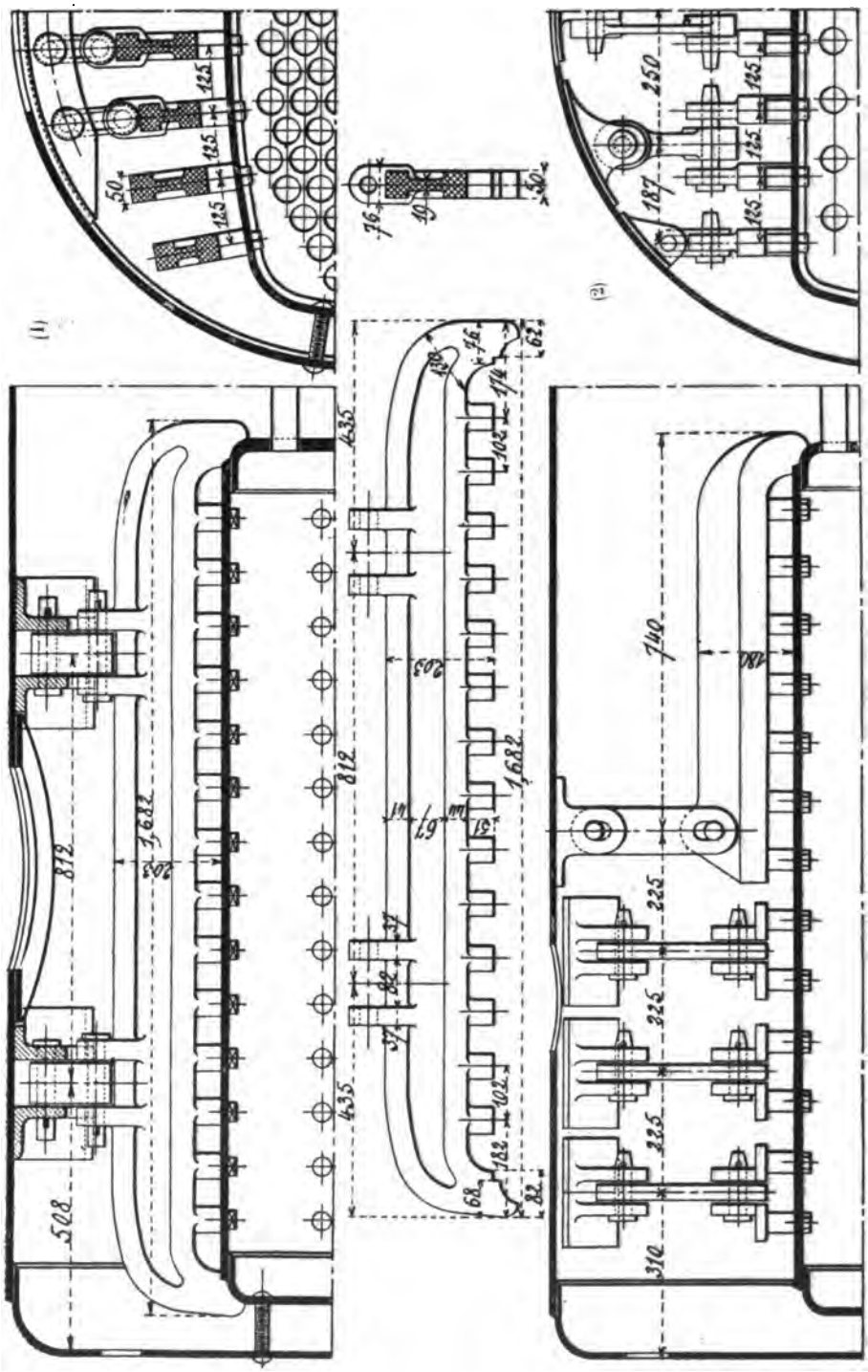


Fig. 348. — Types de consolidation du ciel de foyer :
(1) Par fermes longitudinales suspendues (*North Eastern Railway*) ; les fermes sont en acier moulé ; (2) par demi-fermes longitudinales à l'avant et par tirants à dilatation à l'arrière (*Great Western Railway*).

Pendant ce temps, les corbeaux suivent les variations de la température

de la masse d'eau en retard sur celle du foyer, s'élèvent lentement et d'une manière progressive. L'intervalle qui sépare les extrémités des fermes diminue à partir du moment où la pression a atteint 1 kg. C'est à une pression de 9 kg. que les corbeaux rejoignent les extrémités des fermes et, à partir de ce moment, le contact reste permanent.

La liaison des fermes au berceau du foyer peut s'opérer de plusieurs manières présentant d'ailleurs entre elles les plus grandes analogies. Nous examinerons d'abord le cas des poutrelles longitudinales. Elles sont rattachées au berceau chacune par deux bielles ou deux étriers articulés d'une part environ au tiers de leur longueur et d'autre part à des fers T ou à des cornières cintrées et rivées sur le dessous du berceau. L'écartement plus ou moins grand des bielles supportant chaque ferme est déterminé par le diamètre de l'ouverture pratiquée au-dessus du foyer et recevant ordinairement les cuvettes des soupapes de sûreté.

Nos figures représentent les diverses dispositions adoptées dans la pratique.

Dispositif du North London (fig. 346) (2). — Un système analogue est employé par le *London and North Western.* — Les fermes sont en fer forgé et amincies à la partie haute. Elles sont supportées chacune par deux étriers en fer qui les embrassent et passent entre deux bossages des vis d'attache, et reposent sur des bouchons goupillés passés à travers les ailes verticales de deux cornières parallèles entre lesquelles elles pénètrent. Ce système est simple et permet la libre dilatation du foyer, mais il demande une certaine précision d'ajustage.

Disposition du London Chatham (fig. 372). — Les fermes, en acier moulé, sont supportées deux à deux par des étriers au moyen d'un boulon commun qui les traverse. Ces étriers sont placés dans un plan longitudinal et embrassent, à la partie supérieure, un fer T cintré, rivé au berceau, sur lequel elles sont articulées au moyen d'un boulon claveté. La dilatation est aussi libre que dans le type précédent.

Dispositif de la Compagnie de l'Ouest (fig. 346) (1). — (Mach. 3500, 2000, etc.) — Est semblable au précédent, seulement les étriers sont remplacés par des tirants réglables. Les fermes sont forgées.

Dispositif du London Brighton (fig. 347) (1). — Les fermes portent à leur partie supérieure, à environ de 0,50 m. de chacune de leurs extrémités, un œil à fourche venu de forge dans lequel passe un boulon qui lui sert d'articulation, directement pour les deux rangées extérieures de chaque côté, et par l'intermédiaire de petites menottes pour les quatre rangées du milieu, avec les cornières adossées rivées au berceau. Les axes de ces articulations

sont formés par de longues tiges communes aux deux articulations de chaque ferme. Cette disposition était nécessaire pour permettre le démontage des fermes, par l'avant, l'absence de trou d'homme, la hauteur du ciel et des fermes rendant l'arrière de la chambre de vapeur inaccessible.

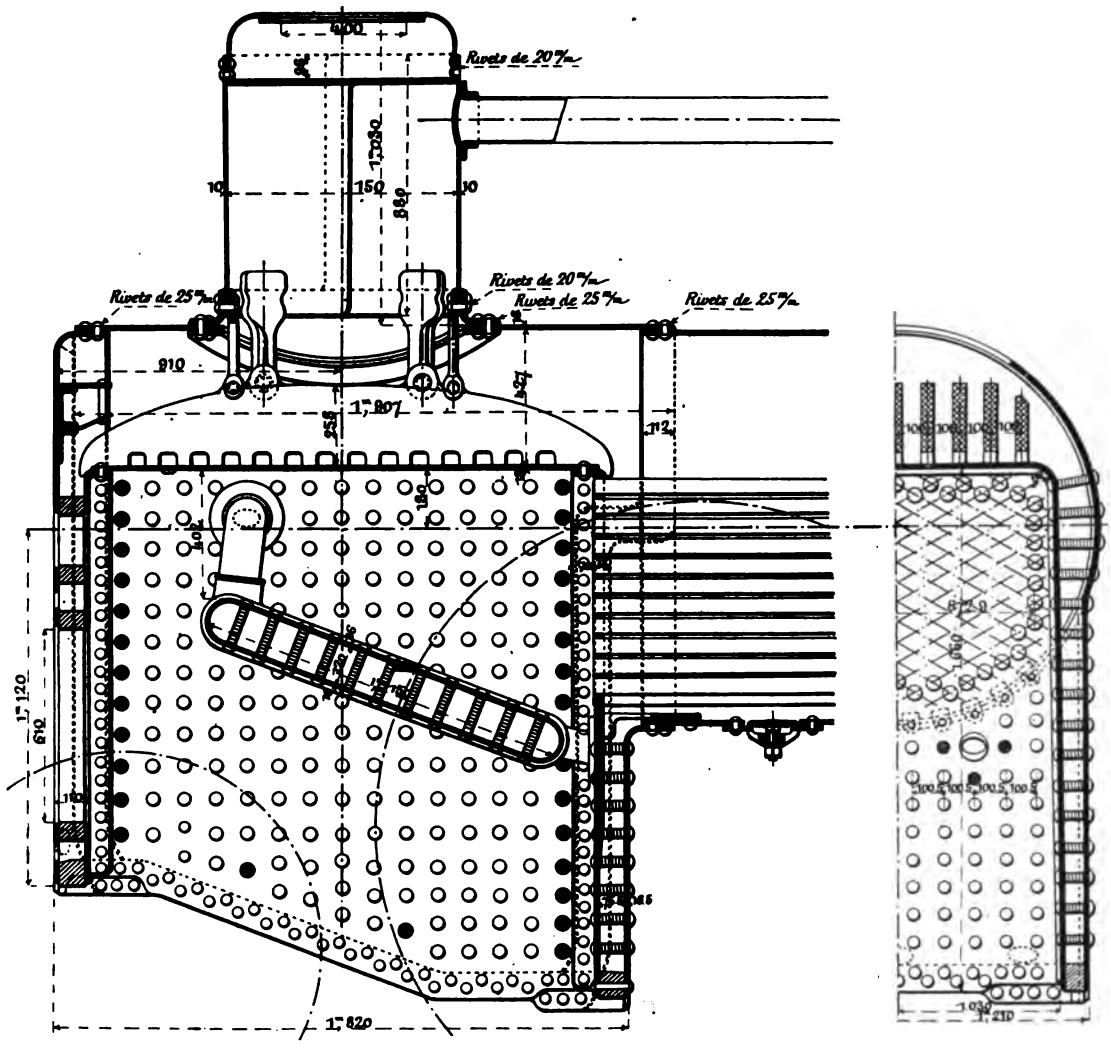


Fig. 349. — Boîte à feu (type Crampton) des locomotives à grande vitesse (série 77 à 86) du *Chemin de fer d'Orléans.*

Dispositif du Great Eastern (fig. 347) (2). — Employé aujourd'hui avec quelques variantes par d'autres compagnies anglaises, entre autres le *North Eastern* (fig. 348) (1). — Les fermes sont en acier moulé; les deux rangées extérieures ne sont pas supportées. Les quatre rangées du centre sont suspendues à l'aide de menottes articulées, d'une part à des œils venus de fonte avec les poutrelles, de l'autre à des axes traversant deux cornières

cintrées et adossées rivées à l'enveloppe, entre lesquelles elles pénètrent.

Pour que le ciel présente par lui-même une certaine raideur, autant que

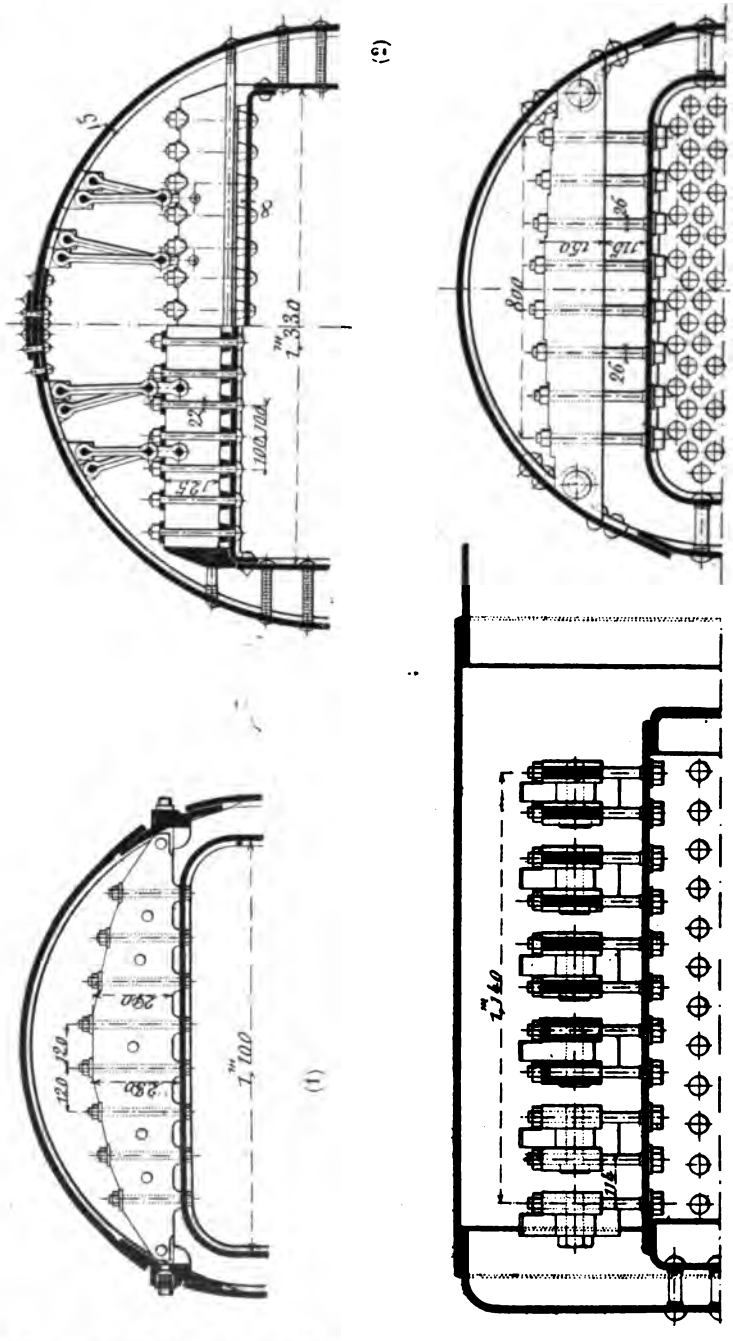


Fig. 350. — Types de fermes transversales :
(1) Reposant sur des consoles rivées au berceau (*Midi*); (2) suspendues (disposition américaine, Schenectady);
(3) surélevées et articulées à leurs extrémités à des pattes rivées au berceau (*État russe*).

pour placer quelques tubes de plus, on lui a donné une forme légèrement cintrée. Les fermes sont disposées normalement à cette surface courbe.

Dans ce dispositif, comme dans les trois précédents, il est nécessaire que les trous des axes de suspension soient ovalisés afin de permettre la dilatation.

On trouvera, figure 348 (2), une disposition mixte qui a été adoptée pour les machines express à quatre roues accouplées du dernier type du *Great Western Ry*. La partie avant du ciel est consolidée par des fermes suspendues par leur partie arrière au berceau et reposant à l'avant sur la plaque tubulaire, comme les poutrelles ordinaires non supportées. La portion arrière du ciel est armaturée au moyen de tirants de forme spéciale dont nous parlerons plus loin.

Dispositif de la Compagnie d'Orléans (fig. 349). — Les fermes sont supportées par des tirants fixés au cadre de la colonnette des soupapes de sûreté ou à l'embase du dôme.

En France, dans quelques parties de l'Europe continentale et aux Etats-Unis, on emploie de préférence aujourd'hui les *fermes transversales* qui sont inconnues au contraire sur les lignes de la Grande-Bretagne. On trouvera, figures 351, 353, 355, des ensembles de foyers dont les ciels sont consolidés par ce moyen. Les figures 350, 352, 354 représentent les principales dispositions de détail adoptées en France et à l'étranger.

Disposition classique employée, avec quelques variantes, par les Compagnies du Midi et de l'Est (fig. 350) (1). — Les fermes, qui sont à doubles flasques, reposent à leurs extrémités sur des corbeaux en fer forgé, formant saillie sur l'intérieur des embases des bouchons de lavage.

Disposition de la Compagnie de l'Ouest (fig. 351, 352). — Les fermes sont à flasques simples fixées au ciel par des vis. Leurs extrémités s'appuient normalement sur des corbeaux venus de forge avec un patin rivé au berceau. Un certain nombre des plaques de ces corbeaux reçoivent des bouchons de lavage. Cette disposition a été appliquée aux locomotives express à bogie (série 951 à 990).

Dans ces deux dispositifs, lorsque le foyer se soulève sous l'influence de la dilatation, les poutrelles se détachent des corbeaux et rien ne fait obstacle à la dilatation du foyer qui s'opère librement.

Disposition de l'État russe (fig. 350) (3). — A une hauteur de 0,115 m. au-dessus du ciel, on dispose un certain nombre de poutrelles transversales fixées par leurs extrémités, deux à deux, au moyen d'un axe longitudinal, à des pattes rivées sur l'enveloppe, à l'intérieur. Dans ce système, les poutrelles font partie, non plus du foyer, mais de la chaudière sur laquelle elles sont fixées à demeure. Le ciel est supporté sur ces traverses au moyen de

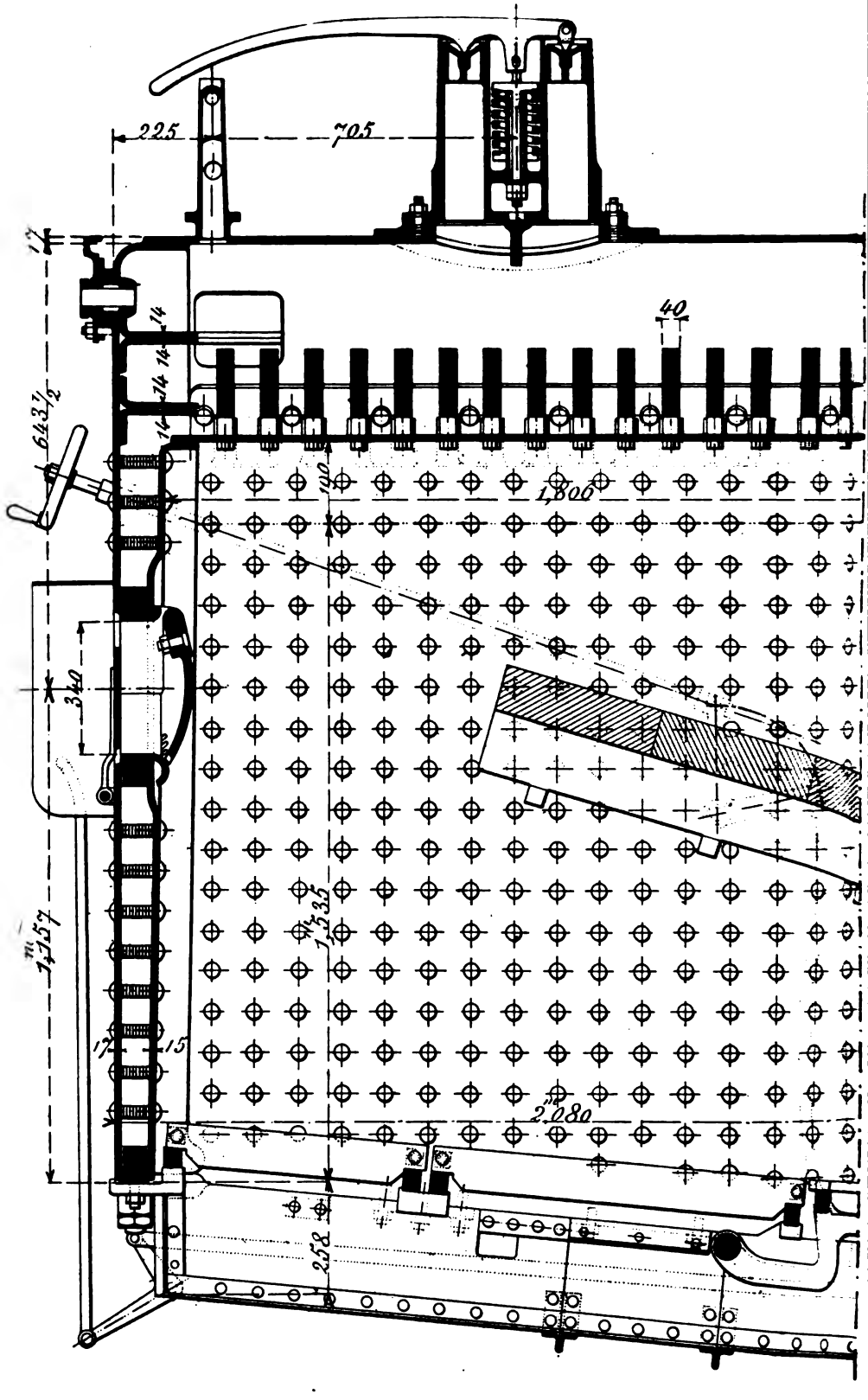
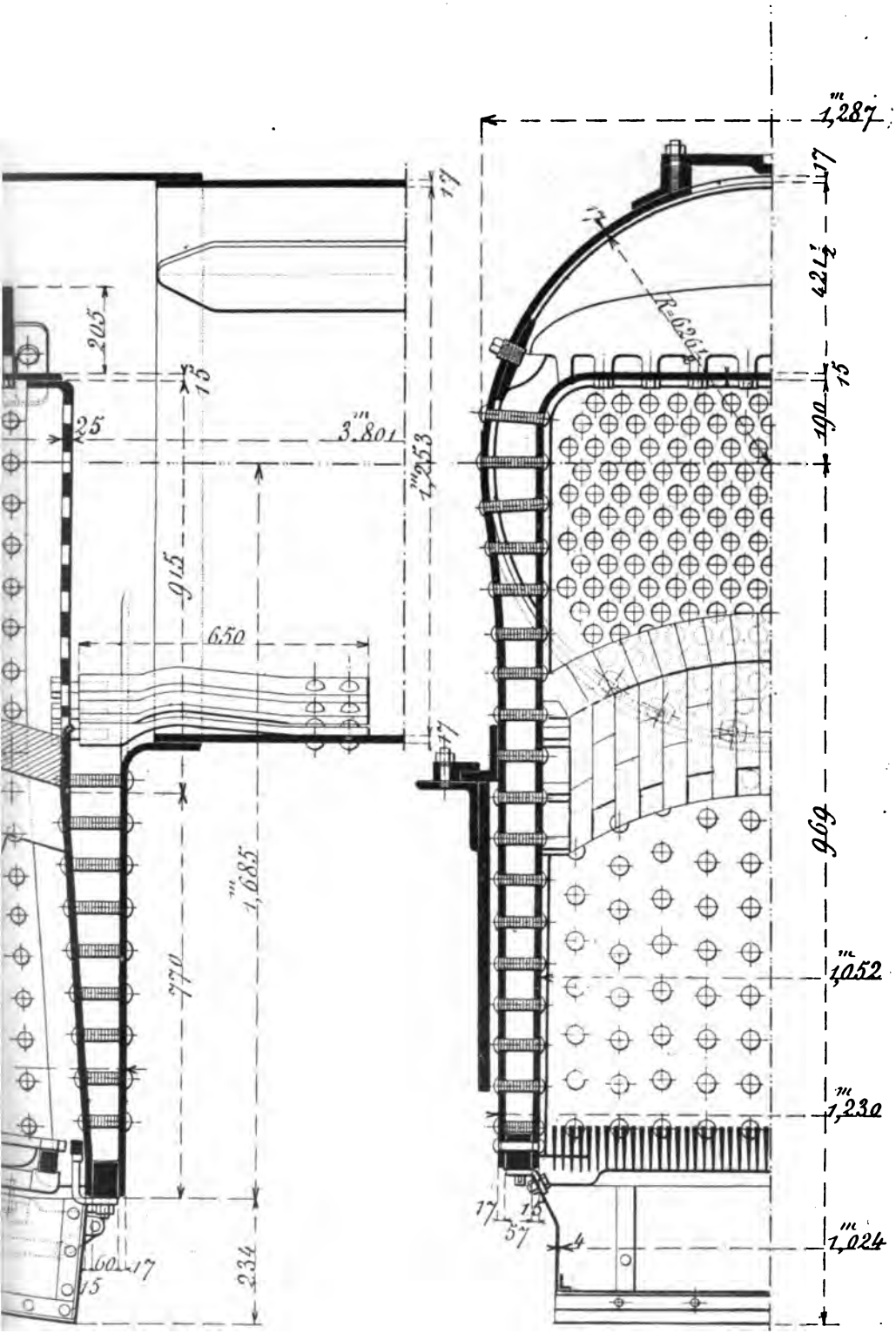


Fig. 351. — Boite à feu (type Crampton avec fermes transversales) des locomotives



quatre roues accouplées et à bogie (série 963-990) des *Chemins de fer de l'Ouest.*

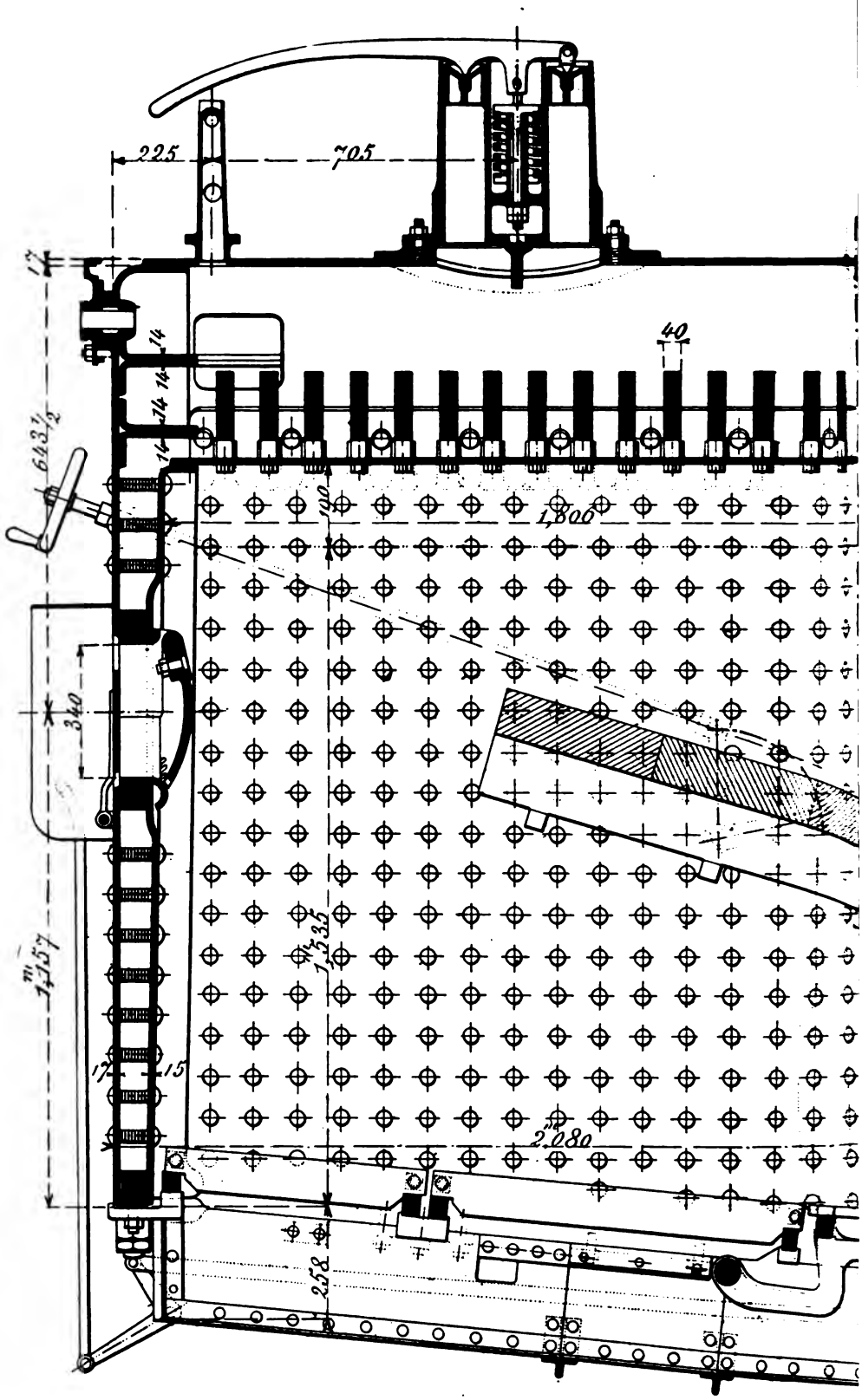
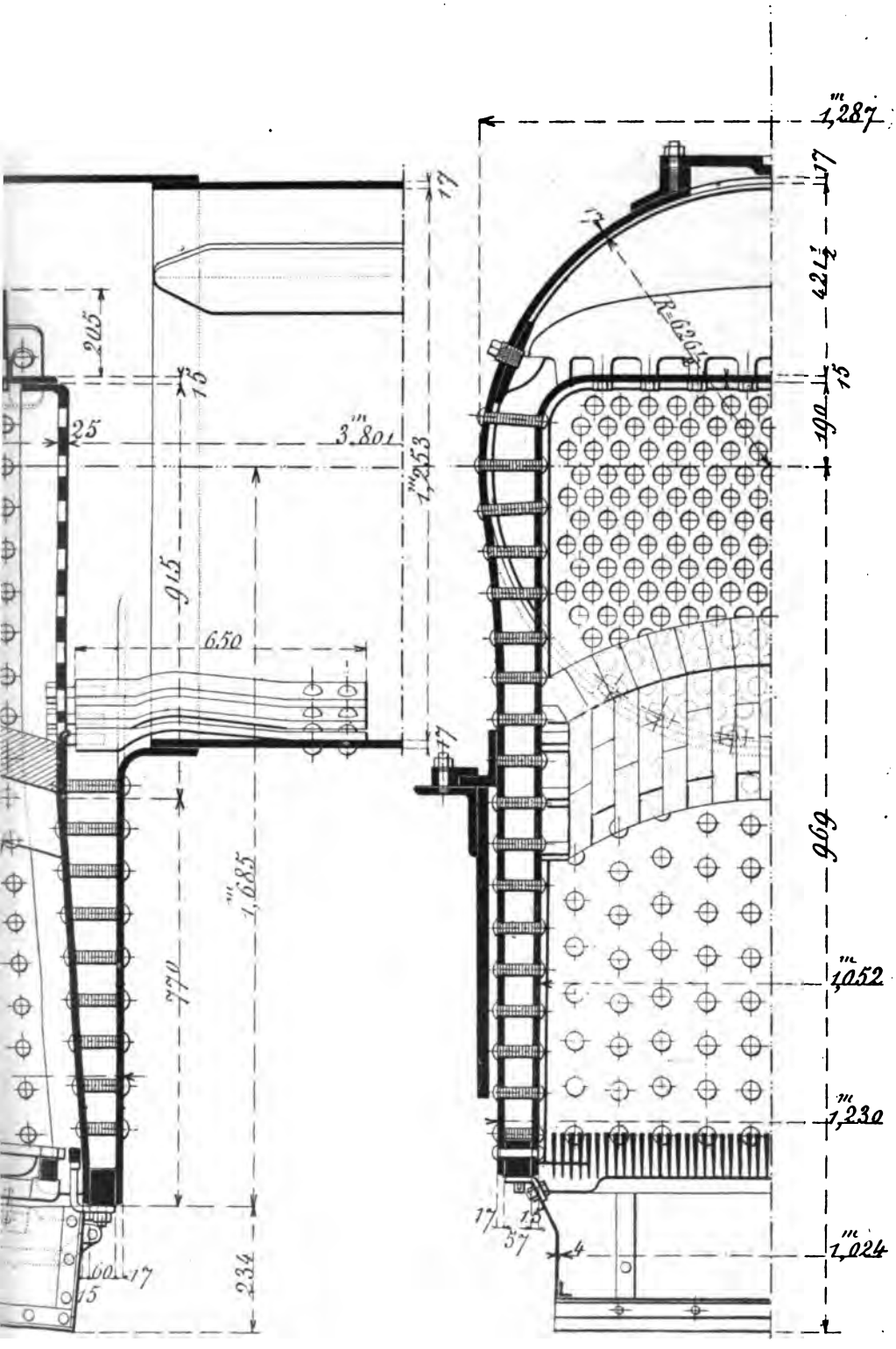


Fig. 351. — Boite à feu (type Crampton avec fermes transversales) des locomotive



quatre roues accouplées et à bogie (série 963-990) des *Chemins de fer de l'Ouest.*

boulons qui les traversent à frottement doux dans des bossages alésés, et reposent normalement à leur partie supérieure par des écrous sur des faces dressées. Ces boulons sont libres de se soulever avec le foyer pour obéir aux mouvements de dilatation, mais ils empêchent tout affaissement.

Disposition typique américaine (fig. 350) (2). — Les fermes, à doubles flasques, sont supportées, de chaque côté de l'axe, par deux paires de tirants,

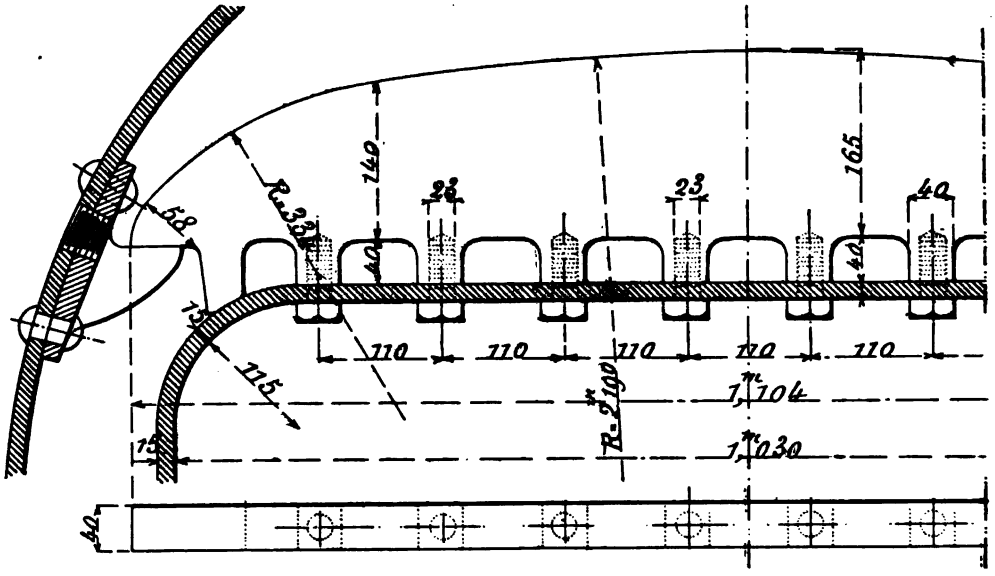


Fig. 352. — Consolidation du ciel du foyer par fermes transversales s'appuyant sur des consoles rivées au berceau de la boîte à feu (*Chemins de fer de l'Ouest;* Mach. à grande vitesse 963-990).

en fer forgé, analogues à des maillons d'une chaîne-galle, articulés, en bas à des axes traversant les fermes, et, en haut, à des boulons maintenus par des supports rivés au berceau.

Autre disposition américaine (fig. 355) (*New York Central*), employée quand le foyer est surmonté d'un dôme, et analogue à la disposition de la *Compagnie d'Orléans.* — Les fermes sont suspendues au berceau par des tirants à fourche et, par le travers du dôme, au moyen de bielles plus longues articulées vers le haut à des œils solidaires de patins rivés au fût.

Dans les foyers comportant des poutrelles, on doit autant que possible ménager, sur le haut de la boîte à feu, au milieu, un trou d'homme permettant la mise en place et le réglage des bielles ou étriers d'attache. Le couvercle de ce trou d'homme sert ordinairement de support aux colonnettes des soupapes.

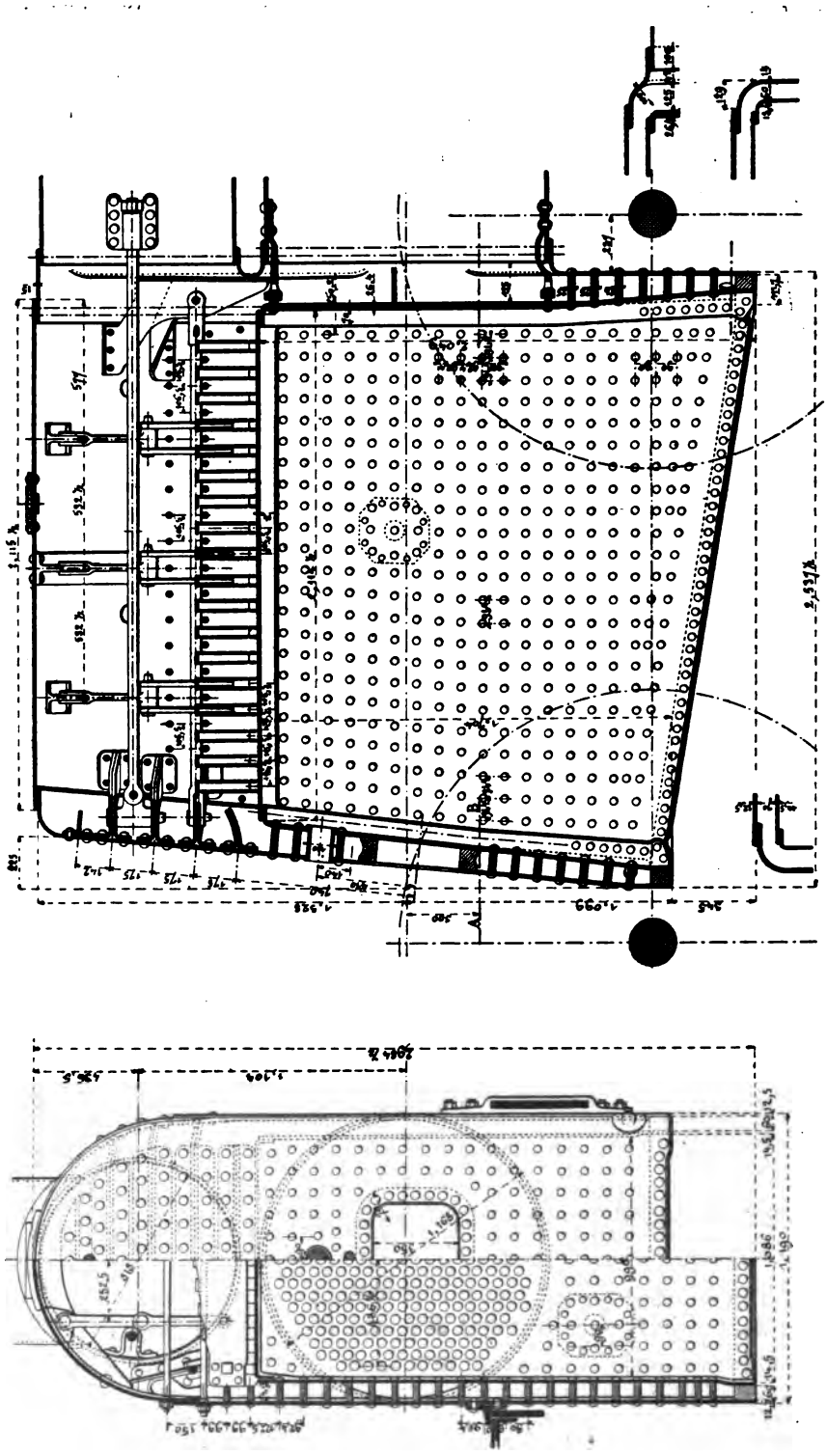


Fig. 353. — Foyer, avec fermes transversales, des locomotives à grande vitesse (série 800) des *Chemins de fer de l'Est* (chaudière Flaman).

198. Consolidation par tirants. — Dans ce système (fig. 356, 357, 358), on applique, à la consolidation du ciel, les mêmes méthodes que pour les côtés du foyer, en introduisant quelques variantes nécessitées par les circonstances spéciales dont les plus marquantes sont le défaut de parallélisme des deux parois à relier et le plus grand espacement qui les sépare.

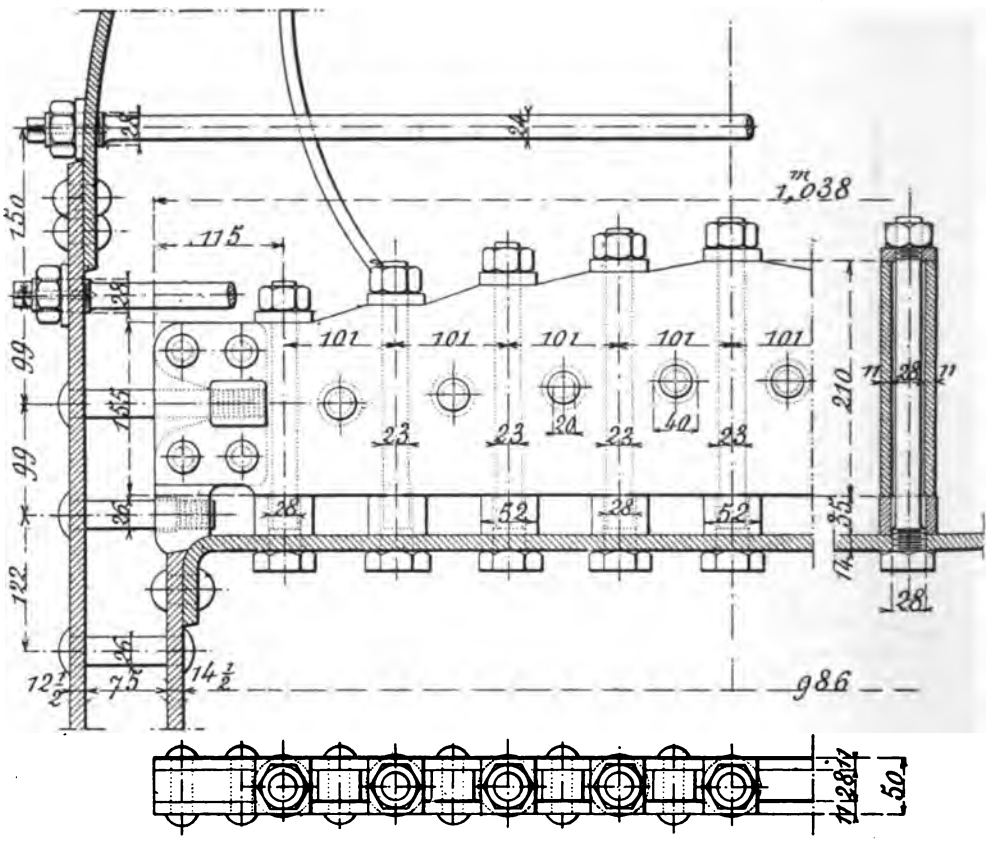


Fig. 354. — Consolidation du ciel de foyer par fermes transversales s'appuyant sur les parois du foyer. Les fermes sont à double flasque et servent aussi d'entretoisement entre les deux parois de la boîte à feu (*Chemins de fer de l'Est ;* Machines à grande vitesse à chaudière Flaman, série 800).

On doit à ce point de vue distinguer trois cas :

(1) Le ciel du foyer est plat et le berceau circulaire ;

(2) Le ciel du foyer est plus ou moins cintré ;

(3) Le dessus du berceau est plat et parallèle au ciel du foyer.

Le premier dispositif s'applique aux foyers de forme Crampton. Le ciel du foyer (fig. 359) est consolidé par des tirants vissés dans sa paroi et dans celle du berceau. Ce dernier étant cylindrique, sa surface — sauf

pour la rangée du centre — se présente obliquement par rapport aux

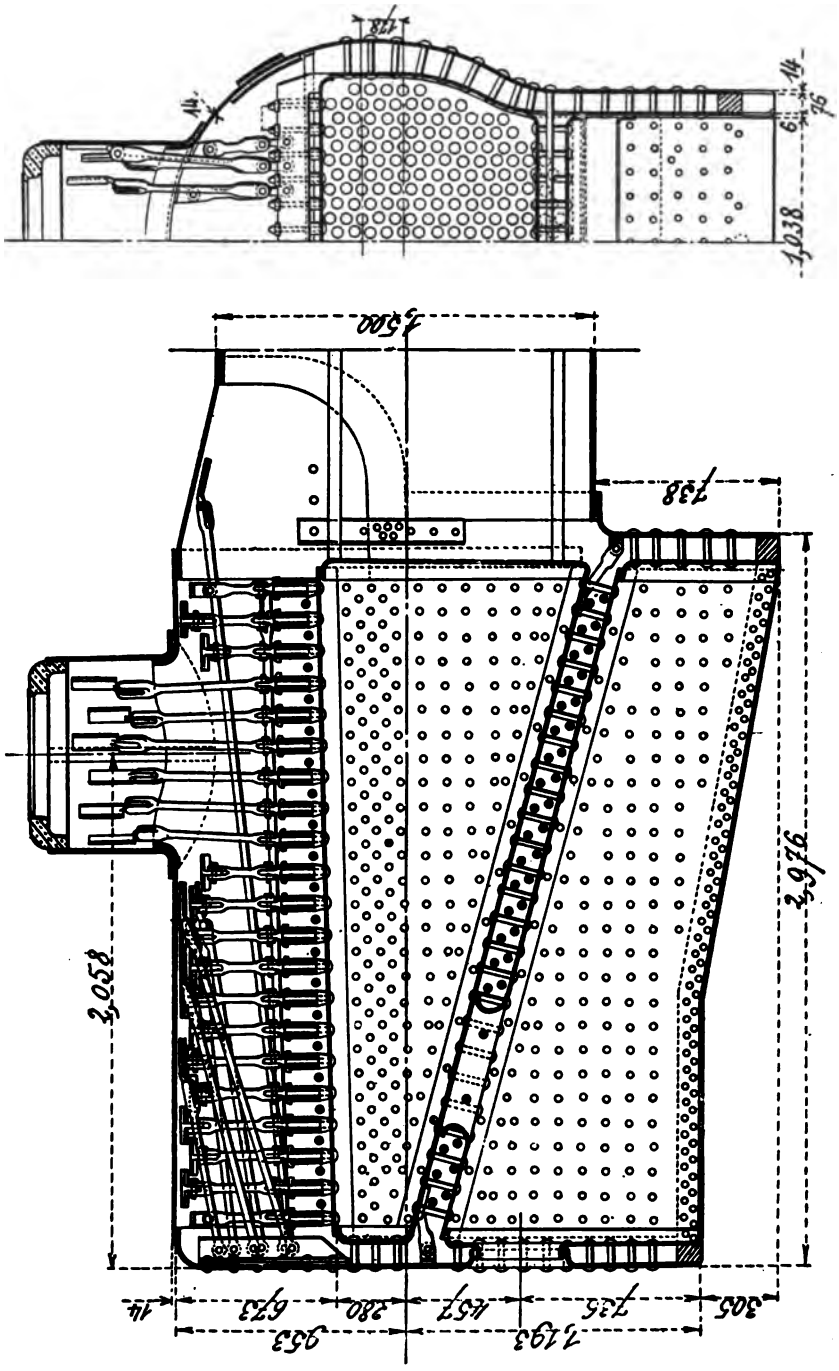


Fig. 355. — Boîte à feu des locomotives à grande vitesse du *New-York Central Railroad*.

tirants qui sont verticaux et normaux au ciel ; on rattrape la différence au moyen de cales coupées en sifflet (fig. 341) (1). C'est le type d'arma-

ture le plus simple et le plus léger que l'on puisse employer ; il est usité en France surtout par la *Compagnie de l'Est* (Machines à six roues accouplées type 1 000 à 3 000), très répandu en Allemagne, en Suisse, en Italie et en Angleterre par le *Great Northern* et le *South Eastern*. En donnant aux coins du foyer de très grands arrondis, c'est-à-dire en leur donnant une forme qui offre de la résistance par elle-même, on peut réduire à six ou

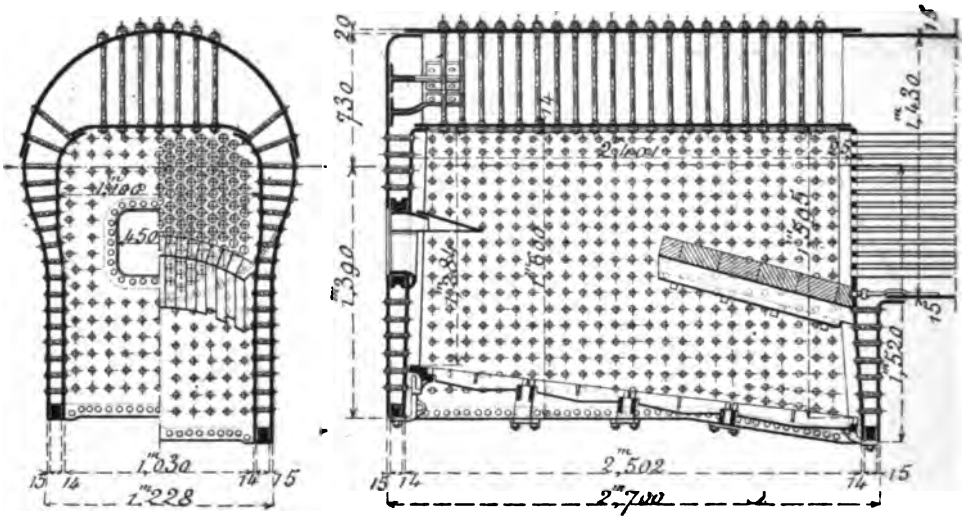


Fig. 356. — Boite à feu du type Crampton, avec armaturage du ciel par des tirants.

sept, dans les plus grosses chaudières, le nombre des rangées de tirants. L'inconvénient de cette disposition réside dans l'obliquité des tirants par rapport à la tôle d'enveloppe, qui rend l'étanchéité plus difficile à obtenir, et dans l'inégale longueur des tirants au point de vue de la dilatation. Ce dernier inconvénient est peu marqué quand, grâce à la précaution que nous avons indiquée plus haut, on restreint le nombre des rangées de tirants comme dans la chaudière de l'*Est* (fig. 298, 359). Ces tirants se trouvant groupés dans la partie centrale ne présentent entre eux que de faibles différences de longueur.

Le berceau, restant circulaire, n'a besoin d'aucune consolidation transversale, comme dans le cas des foyers Belpaire.

Pour éviter les inconvénients d'une trop grande obliquité des tirants, on a eu l'idée de cintrer le ciel du foyer suivant une courbe se rapprochant du cercle concentrique au berceau. M. Stroudley a le premier, croyons-nous, appliqué cette disposition dans toute sa rigueur. On trouvera, figure 358 (3), la demi-coupe du foyer des petites machines du type *Terrier* du *London Brighton*. Les deux plaques sont reliées par des entretoises dont l'obliquité est à peu près également partagée. La consolidation du ciel est effectuée suivant

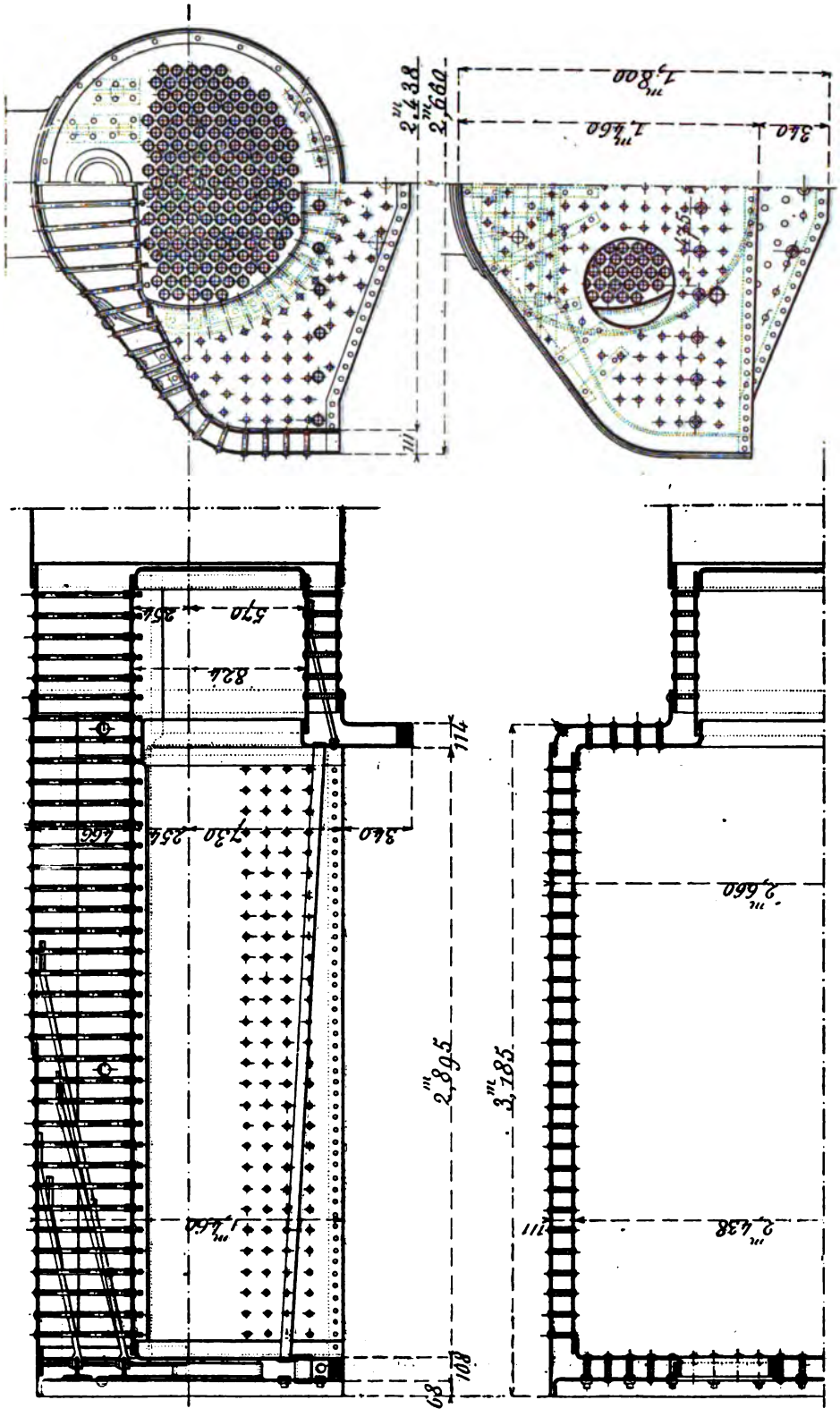


Fig. 357. — Type de foyer Wootten, armaturé par des tirants.

le même système que celle des parois. M. Stroudley a dû employer, tout au moins pour les premières rangées, des entretoises à dilatation. Pour éviter

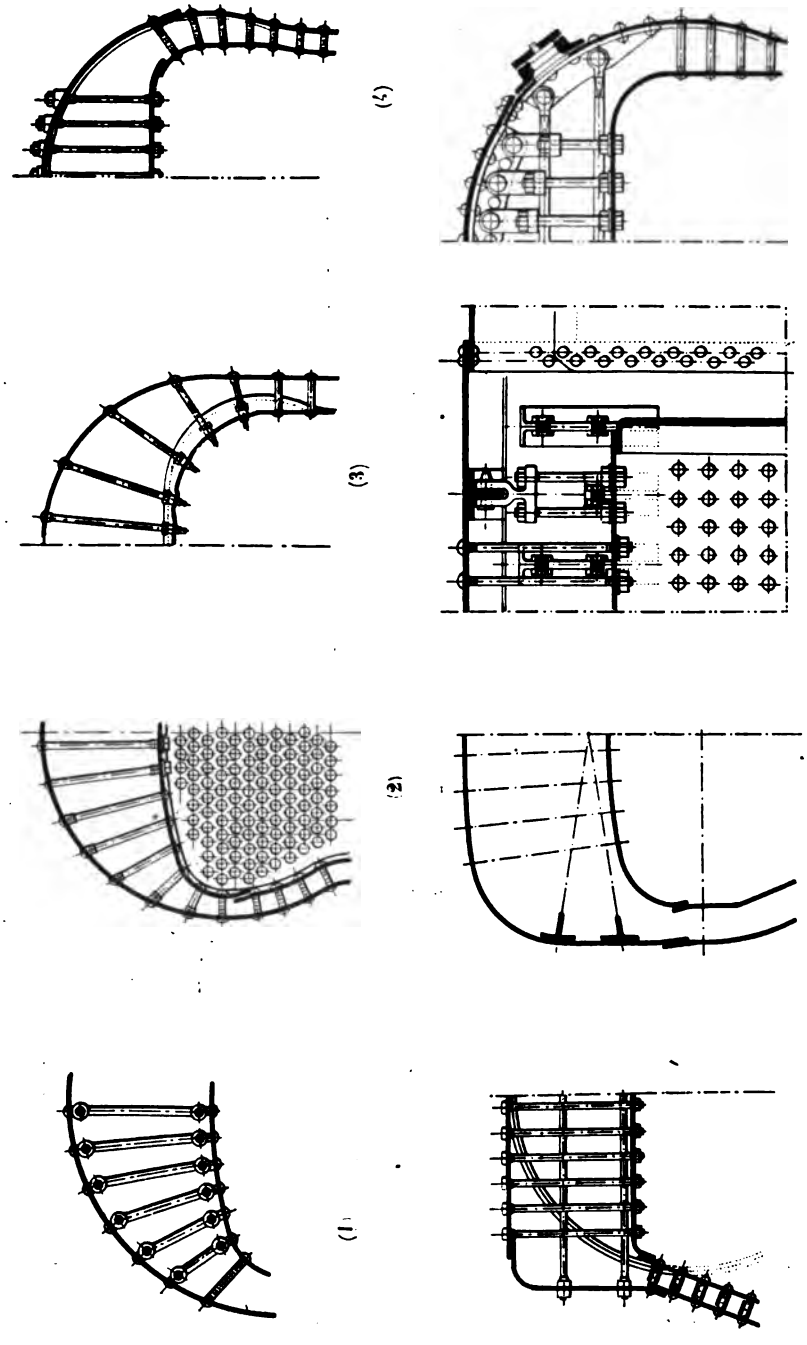


Fig. 358. — Schémas représentant la disposition générale des principaux modes de consolidation du ciel par des tirants, rigides ou à dilatation.

la tendance à l'arrachement de la plaque du foyer au droit des tirants par suite de leur obliquité, on capitonnait cette plaque sur les bords des trous

recevant les tirants de manière que leur surface fut normale à ceux-ci. C'est là une pratique intéressante mais coûteuse et qui ne peut être considérée comme courante.

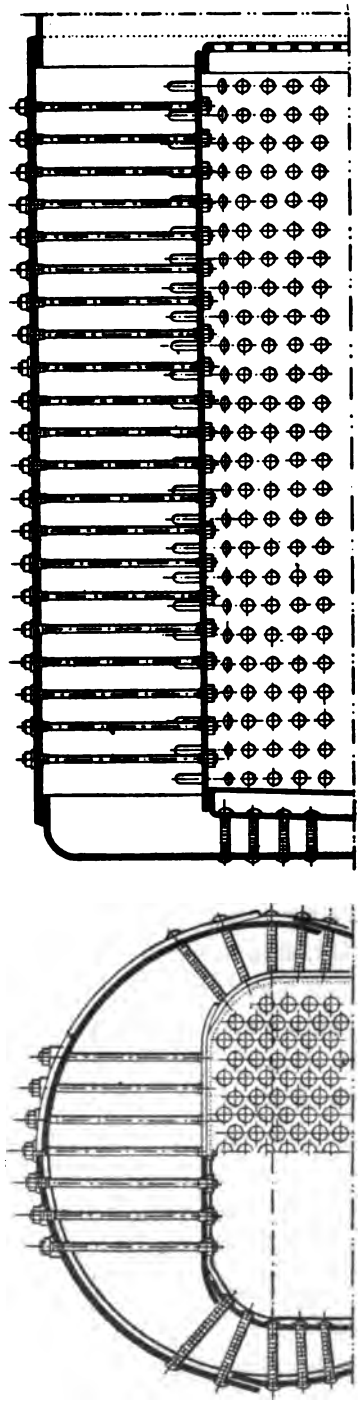


Fig. 359. — Type de consolidation du ciel par tirants parallèles, dans une boite à feu Crampton (*Chemins de fer de l'Est*). Dans les dernières constructions on a disposé, à l'avant, deux rangées de tirants à dilatation.

Le même système est usité aux Etats-Unis d'une manière générale par quelques-uns des plus importants constructeurs de locomotives, par Baldwin et par les Schenectady Locomotive Works entre autres, mais le cintre du ciel est moins accentué (fig. 319, 357, 358 (2), 360). Les tirants sont constitués par de longues entretoises vissées dans les deux plaques et rivées aux deux bouts. Les deux premières rangées sont constituées par des tirants articulés, à trous ovalisés, pour permettre la dilatation de la plaque tubulaire et éviter les ruptures ou le cintrage du ciel entre celle-ci et les premières rangées d'entretoises fixes.

Ce système donne d'excellents résultats aux Etats-Unis, il est simple et léger. Cependant nous ne le conseillerions pas en Europe avec des foyers en cuivre, surtout s'ils sont profonds. Il n'a en effet été appliqué aux Etats-Unis qu'à des foyers en acier assez plats, dont la dilatation est moindre que dans nos foyers. Les rangées obliques d'entretoises forment arcs-boutants dans les coins du foyer et empêchent la dilatation de s'opérer librement, ce qui amènerait des cassures d'entretoise ou des fissures du ciel si la dilatation était prononcée.

Le principal inconvénient des consolidations par tirants réside précisément dans une rigidité exagérée qui ne permet pas aux dilatations de se produire. Cet inconvénient n'est guère

marqué qu'à l'avant, dans le voisinage de la plaque tubulaire en raison de la rigidité de cette dernière qui ne saurait fléchir. Si la dilatation est très marquée, le ciel peut se fissurer à moins que les premiers tirants ne cassent. Pour éviter cet inconvénient, on remplace ordinairement les deux premières rangées de tirants fixes à l'avant par des tirants à dilatation (fig. 358) (7) et 360). Nous pourrions citer des machines dans lesquelles on a dû opérer après coup ce remplacement dont l'expérience a indiqué la nécessité. Ces tirants à dilatation affectent différentes formes que nous décrirons dans un des paragraphes suivants :

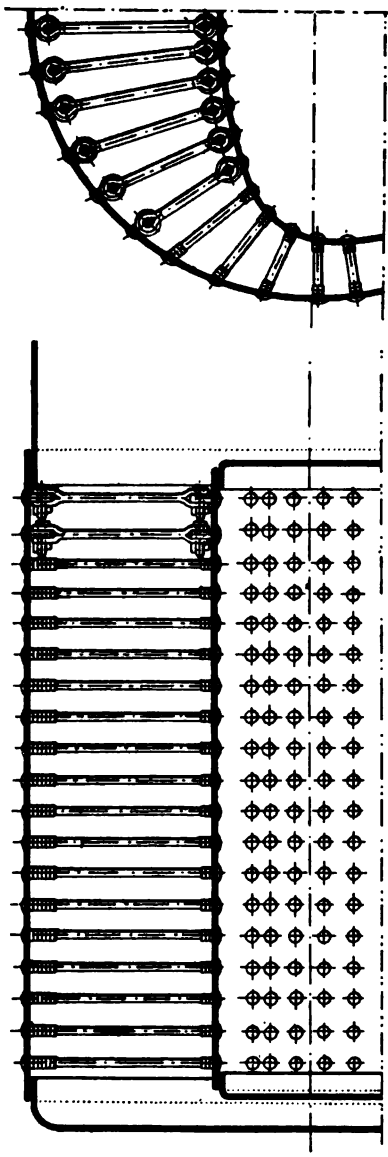


Fig. 360. — Type de consolidation du ciel de foyer par tirants radiaux dans une boîte à feu Crampton ; disposition américaine. Les deux rangées de tirants voisines de la plaque tubulaire sont à dilatation.

La *Compagnie de l'Est*, pour quelques-uns de ses grands foyers Crampton à tirants, a reconnu la nécessité de ménager une certaine dilatation sur l'avant. Elle a essayé à cet effet deux dispositions principales : l'une d'elles est représentée figure 361 dans son application aux nouvelles locomotives à six roues accouplées 3 006 à 3 010. Les deux rangées de tirants les plus voisines de la plaque tubulaire sont remplacées par deux fermes transversales à double flasque supportées sur le berceau, de chaque côté, par une bielle articulée à une cornière rivée à l'enveloppe et commune aux deux poutrelles. La partie avant du ciel est donc libre de se soulever sous l'action des dilatations, la première rangée de tirants rigides n'étant placée qu'à une distance de 0,356 m. de la face arrière de la plaque tubulaire.

Une disposition analogue est employée depuis longtemps par le *Great Northern Ry*. L'autre disposition de la *Compagnie de l'Est* est représentée figure 362 ; elle comporte deux rangées de tirants à coulisse placés à l'avant

du foyer ; ces tirants, à leur partie supérieure, sont vissés dans l'enveloppe et disposés comme les tirants ordinaires. Les portions qui se vissent dans le ciel sont maintenues par des écrous extérieurs placés en dessus.

On emploie, sur quelques réseaux anglais, d'excellents systèmes de sus-

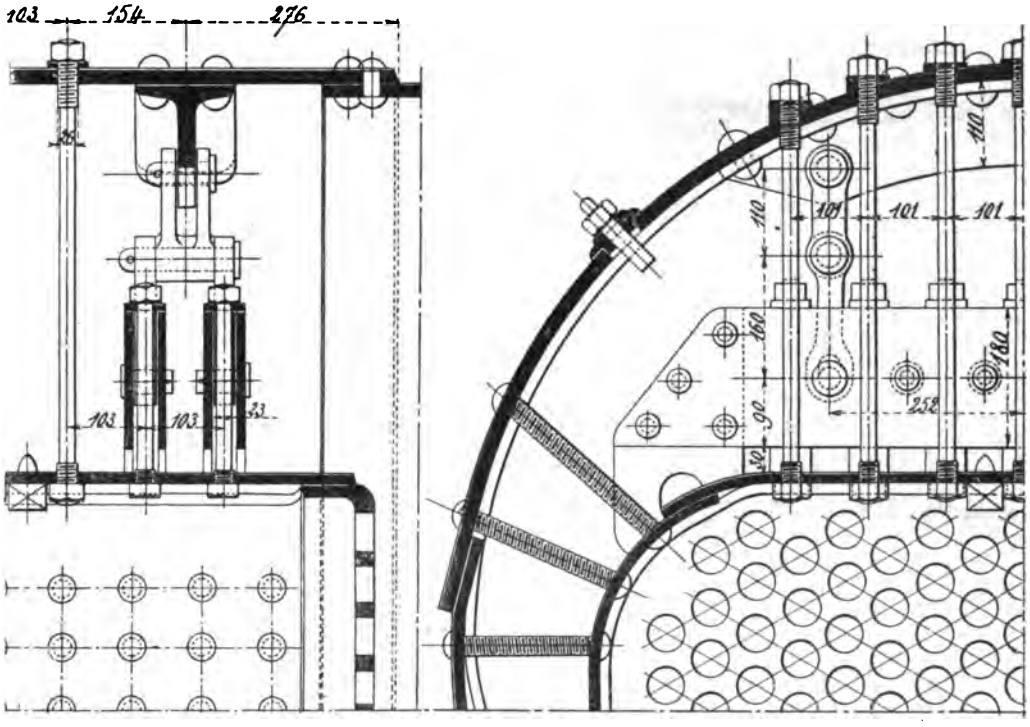


Fig. 361. — Disposition ayant pour but de faciliter la dilatation à l'avant des foyers. Les deux premières rangées de tirants sont remplacées par des fermes transversales suspendues (*Chemins de fer de l'Est ;* mach. 3006 à 3010).

pension, par tirants à dilatation, qui se prêtent à l'emploi des foyers profonds en cuivre mais offrent un peu plus de complication. La figure 363 présente la disposition du *North British* et du *Caledonian*. Le ciel est légèrement cintré et les tirants y sont vissés normalement. Trois par trois, ces tirants sont supportés par un étrier dont ils traversent à frottement doux la branche horizontale sur le dessus de laquelle ils s'appuient normalement par des écrous. Ils peuvent se soulever librement avec le ciel. Ces étriers sont suspendus au moyen d'une articulation à un fer U renversé ou à un fer T, cintrés et rivés au berceau. L'ensemble, sur toute la longueur du foyer, forme un système élastique très satisfaisant. Ce dispositif ne prête le flanc à la critique que par un point que nous signalerons dans le paragraphe consacré aux tirants à dilatation. Un dispositif analogue est usité dans la partie avant de certains foyers Belpaire.

On trouvera, figure 364, une disposition adoptée par le *Great Western* pour ses récentes locomotives express à roues indépendantes. Le ciel est consolidé par douze petites poutrelles en acier moulé, portant sur leur face inférieure des bossages dans lesquels se fixent les vis d'attache sur le ciel du foyer et, à leur partie supérieure, une double nervure percée d'un

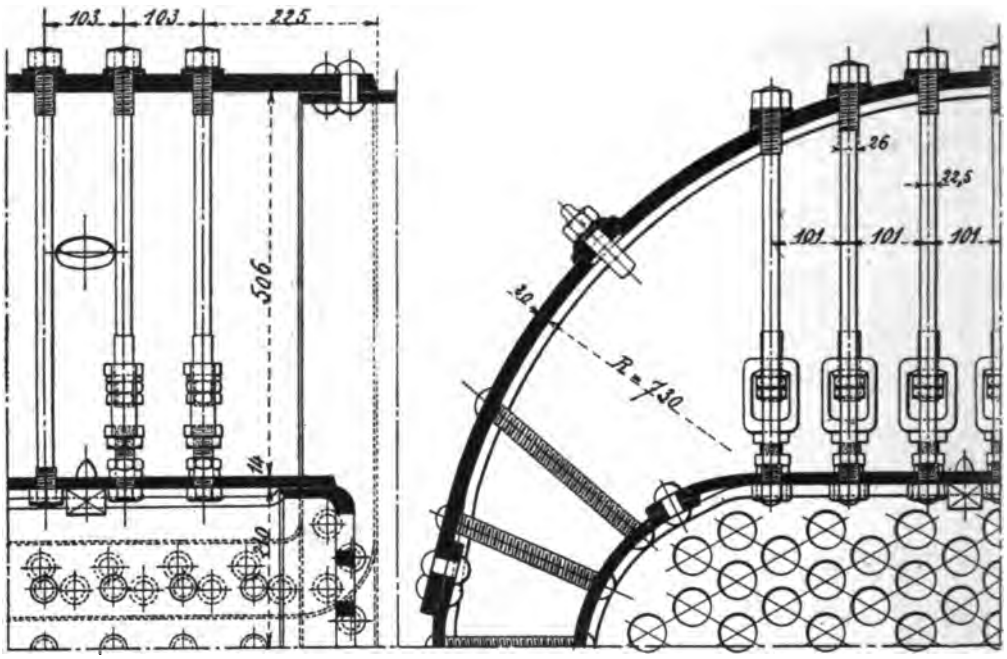


Fig. 362. — Disposition ayant pour but de faciliter la dilatation à l'avant des foyers. Les deux premières rangées de tirants sont à coulisse (*Chemins de fer de l'Est ;* mach. 3001-3005).

œil dans lequel passe un boulon servant d'articulation à des bielles suspendues au berceau par des pattes à fourche. Les articulations ont assez de jeu pour permettre le soulèvement du foyer pendant la mise en pression. On trouvera, figure 317, l'ensemble de la chaudière à laquelle ce dispositif à été appliqué. On remarquera que le ciel, sans être interrompu sur toute sa largeur, porte au milieu un bouilleur transversal qui débouche dans les lames d'eau, à la partie haute, et sert à la fois à compléter la voûte en briques et à consolider le dessus du foyer.

La même Compagnie emploie aussi le dispositif représenté plus haut (fig. 348) (2) ; on trouvera un système analogue (fig. 365) usité en Allemagne.

Du foyer Crampton à tirants on passe facilement au foyer *Belpaire* comme on peut le voir par l'examen des figures voisines 358 (4) (5) (6). Il suffit de donner en coupe transversale, au berceau, une forme semblable à celle du foyer ; les deux surfaces à relier sont planes et parallèles, les tirants ont

tous même longueur et sont vissés normalement. Toutefois, les faces latérales de la boîte à feu sont également planes et il faut les relier elles-mêmes par des tirants transversaux. Au prix de cette nouvelle complication, ce serait acheter assez cher l'avantage que pré-

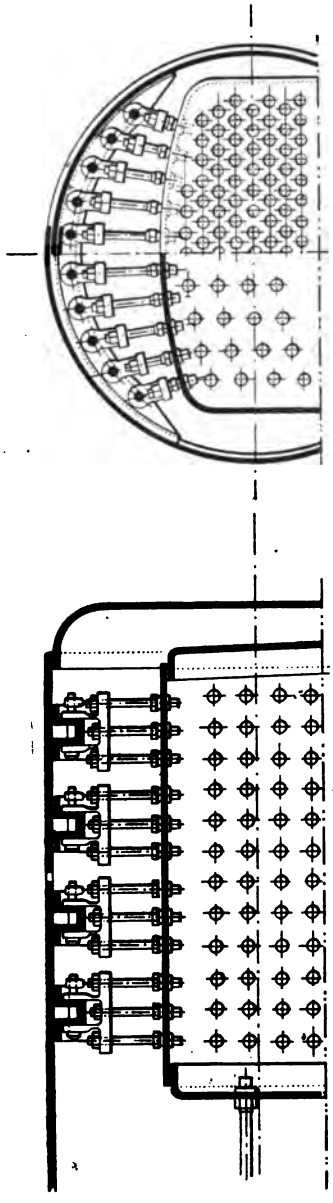


Fig. 363. — Types de consolidation du ciel de foyer par des tirants radiaux à dilatation ; disposition du *Caledonian Railway*.

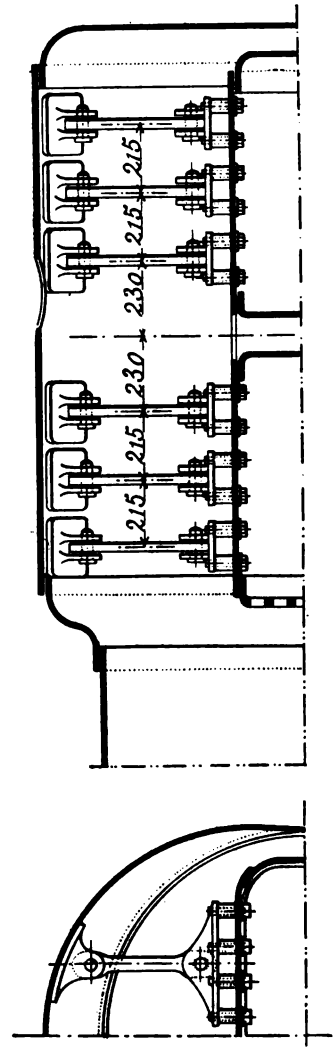


Fig. 364. — Disposition des armatures et tirants à dilatation du ciel de foyer des locomotives à grande vitesse et à roues libres du *Great Western Railway*.

sente le parallélisme du ciel et du berceau au point de vue de l'installation des armatures, si le foyer Belpaire ne présentait pas quelques autres avantages.

Appliqué pour la première fois, il y a une quarantaine d'années, par M. Belpaire, ingénieur des chemins de fer de l'*Etat belge*, ce type de foyer a, lentement d'abord, puis sûrement fait son chemin (fig. 325, 366). En

France, la *Compagnie du Nord* l'a peu à peu adopté pour toutes ses locomotives (fig. 321) ; en 1878, la *Compagnie de Lyon* l'a appliqué à ses machines express (Série 111-400), puis à ses locomotives compound express à quatre et à huit roues accouplées (Séries C-1-3 ; C-21-60 ; 3 211-3 262) (fig. 322, 367). Les *Compagnies du Midi* et de l'*Ouest* l'ont adopté pour leurs récents types et il a lieu de croire qu'il se développera encore par la suite (fig. 323, 324, 368). Le foyer Belpaire a été appliqué à un grand nombre de locomotives construites pour différents réseaux européens, mais il n'est encore usité en Allemagne, en Autriche et en Russie qu'à titre d'exception. En 1895, une Compagnie anglaise, le *Manchester Sheffield*, rompant avec les traditions, a adopté ce type de foyer pour ses nouvelles machines express et s'en trouve jusqu'ici fort bien ; cet exemple sera probablement imité. Ce genre de foyer a franchi l'Atlantique il y a une douzaine d'années et son emploi se répand de plus en plus ; actuellement, il est usité d'une manière générale par le *Pensylvania RR.*, la principale les Compagnies américaines (fig. 326), et par les importants ateliers de Brooks.

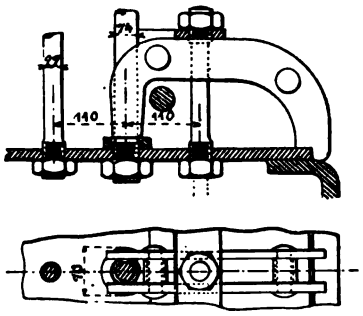


Fig. 365. — Disposition ayant pour but de faciliter la dilatation à l'avant du foyer. Dispositif allemand.

Les avantages du foyer Belpaire peuvent se résumer comme suit :

Toutes les faces à relier étant planes et horizontales, le tracé, la confection et la pose des tirants se trouvent simplifiés et facilités.

L'enveloppe du foyer étant solidement entretoisée peut avoir une épaisseur plus faible que si elle était cylindrique et devait résister par elle-même à la pression intérieure. De fait, cette épaisseur peut être réduite de 2 à 3 mm. ; nous citerons seulement comme exemple les chaudières des express compound de la *Compagnie du Nord*, timbrées à 14 kg. dont les épaisseurs sont de 19 mm. pour le corps cylindrique et de 16 mm. seulement pour le berceau. Il est vrai que le développement des tôles est un peu plus grand.

Ce type de foyer est donc léger puisqu'il dispense de l'emploi des fermes et permet une réduction des épaisseurs.

Il procure une augmentation du volume de vapeur et, ce qui est plus important, grâce à la forme rectiligne de ses parois longitudinales, il dégage l'orifice supérieur des lames d'eau et accroît, au-dessus du ciel, dans la région où la vaporisation est la plus active, l'aire du plan de vaporisation. En outre, cette surface ne se réduit pas, du moins en ce qui concerne la boîte à feu, à mesure que le niveau de l'eau monte dans la chaudière ; on pourra toujours, avec une chaudière à foyer Belpaire, marcher avec un

niveau plus haut que dans celles qui ont le foyer Crampton. C'est peut-être là le principal avantage du système.

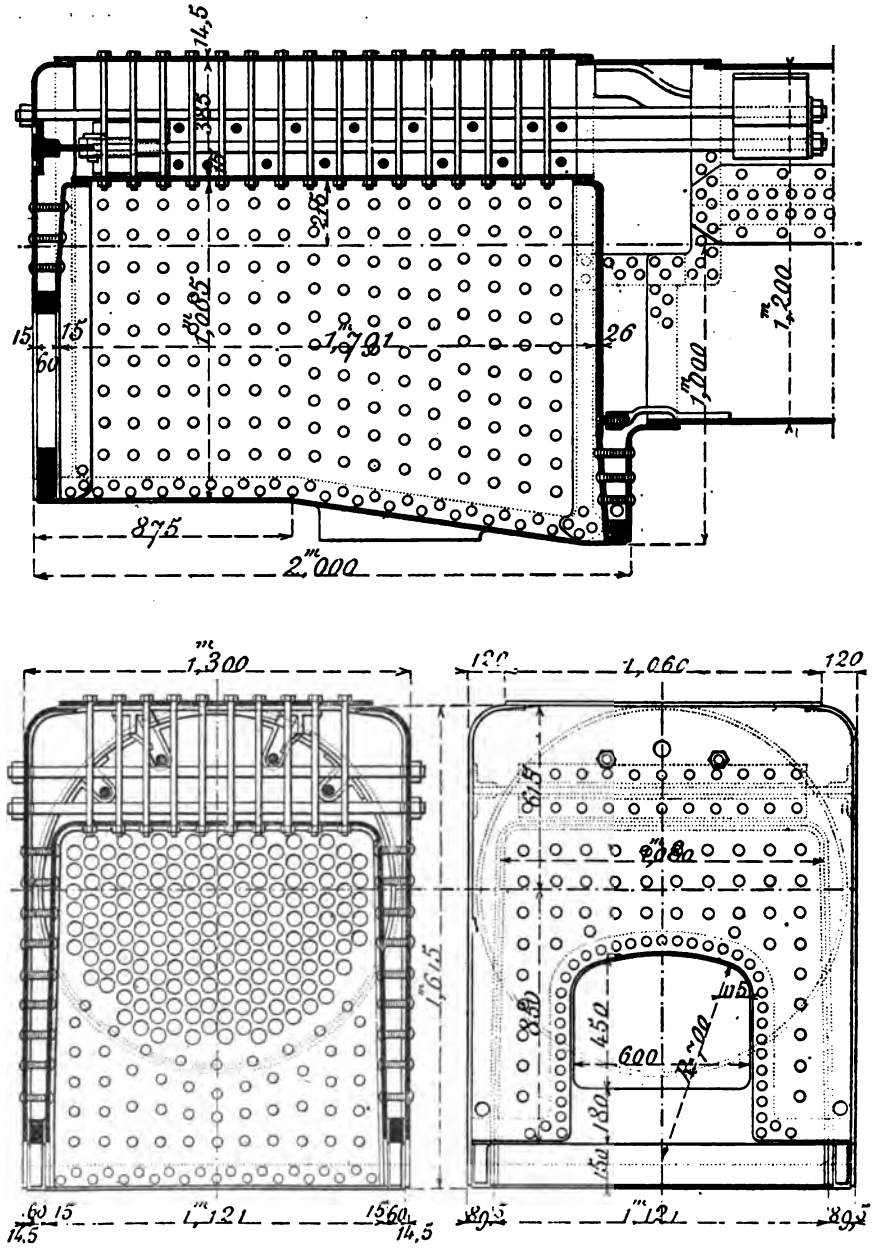


Fig. 366. — Boîte à feu du type Belpaire (*Grand Central belge*).

Comme dans tous les foyers consolidés par des tirants, la vaporisation est facilitée par l'absence de fermes et obstacles de grande surface placés à peu de distance au-dessus du ciel et qui sont sujets en outre à s'entartrer

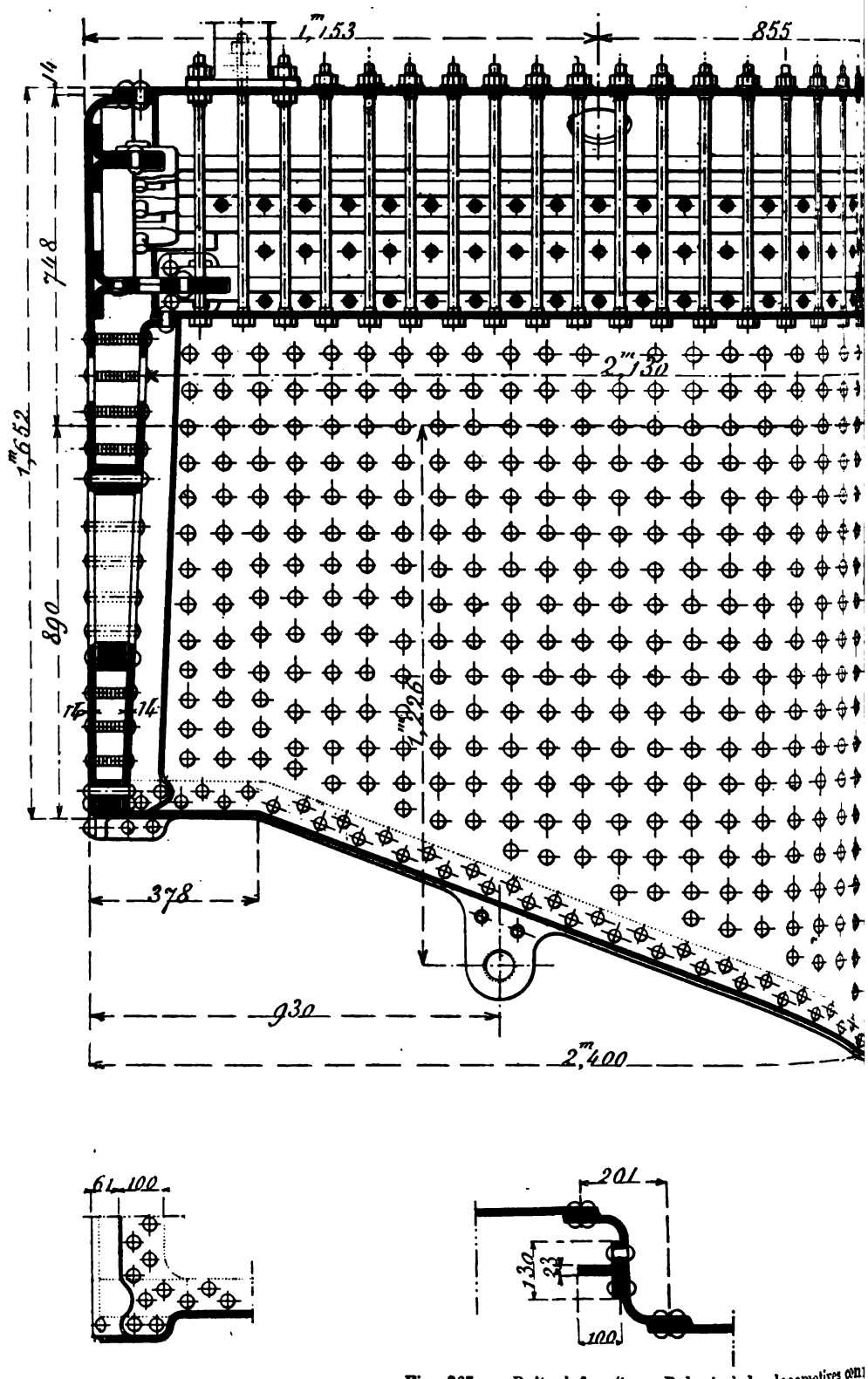
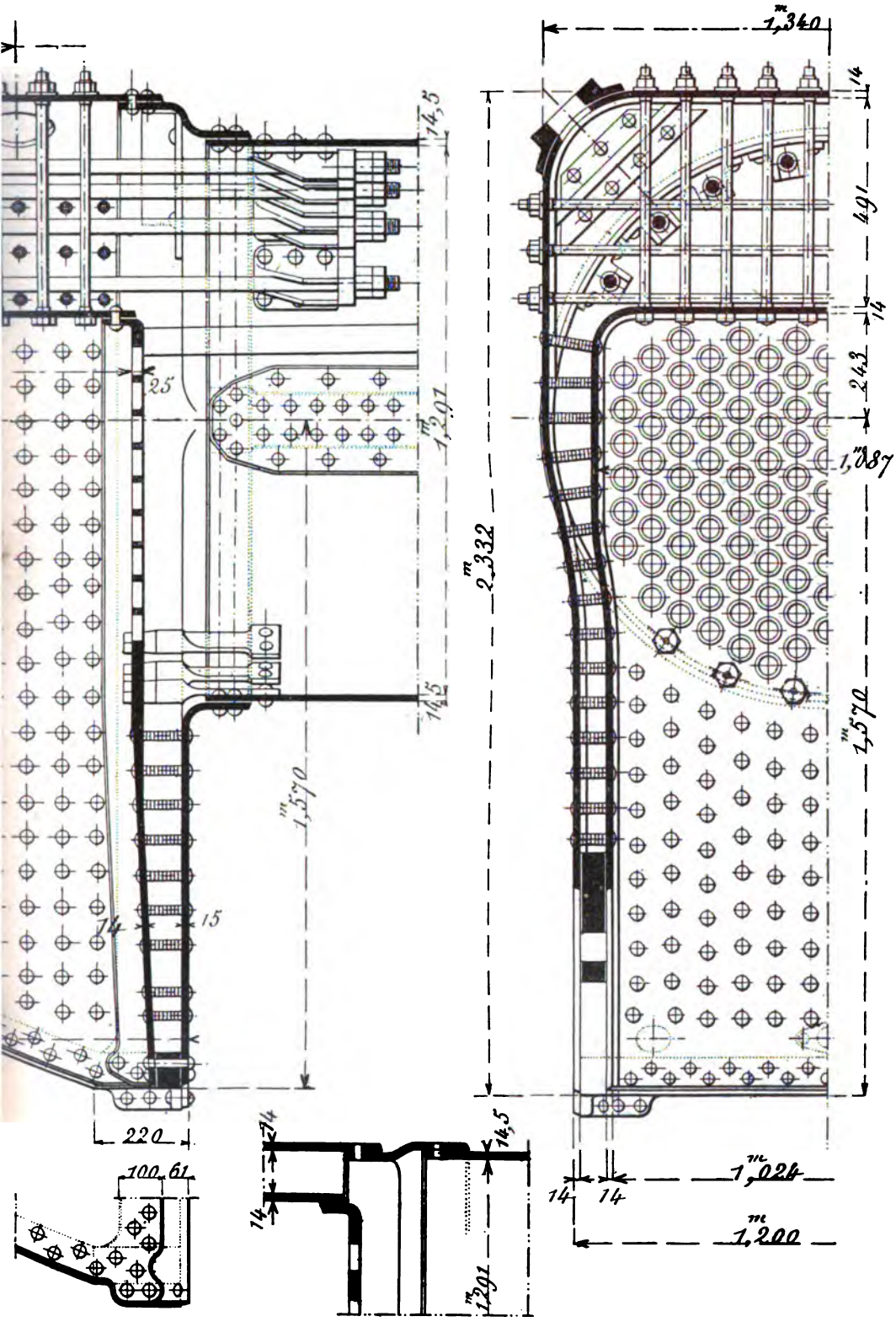


Fig. 367. — Boîte à feu (type Belpaire) des locomotives com



and à grande vitesse (série C-21-60) des *Chemins de fer P.-L.-M.*

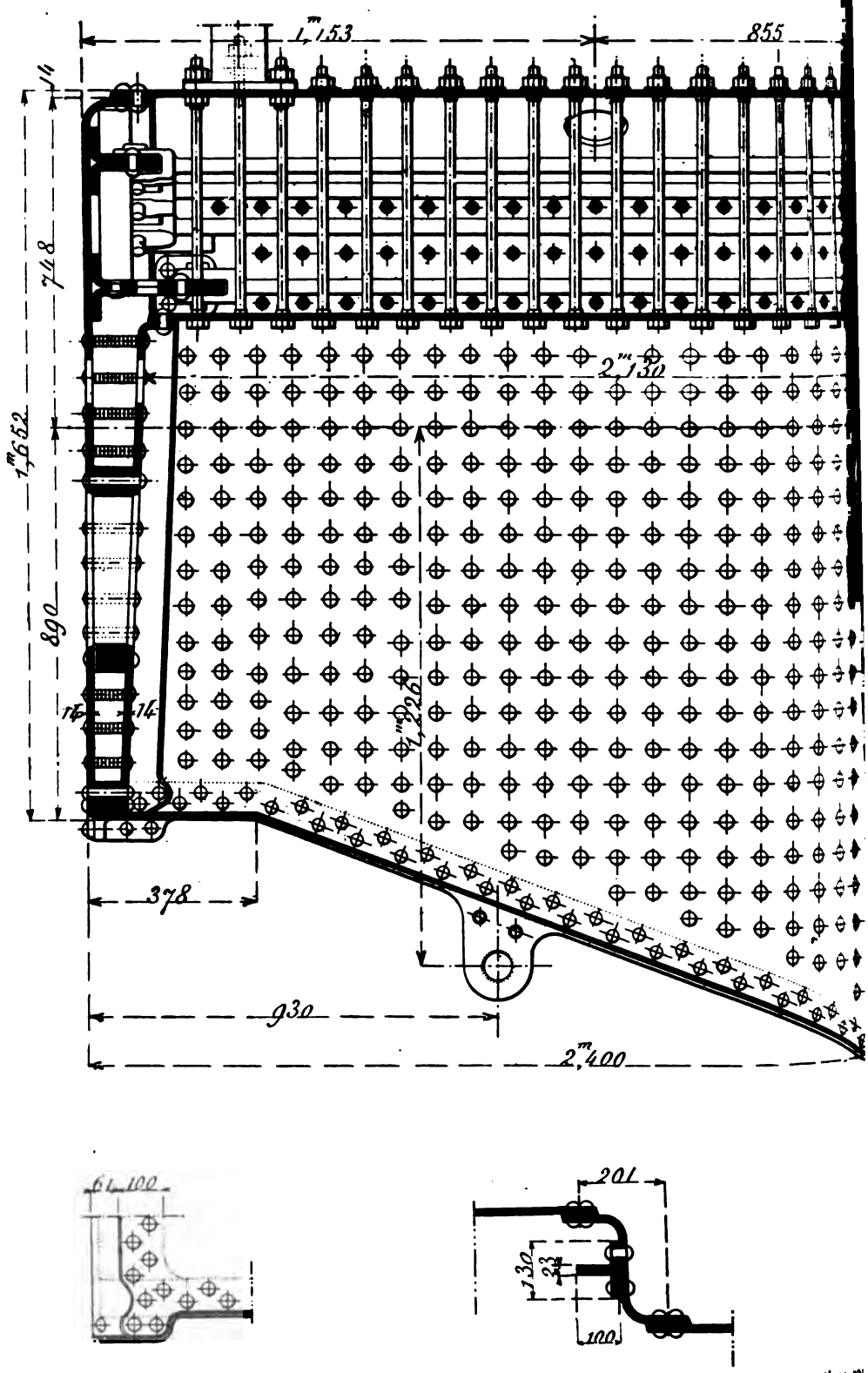
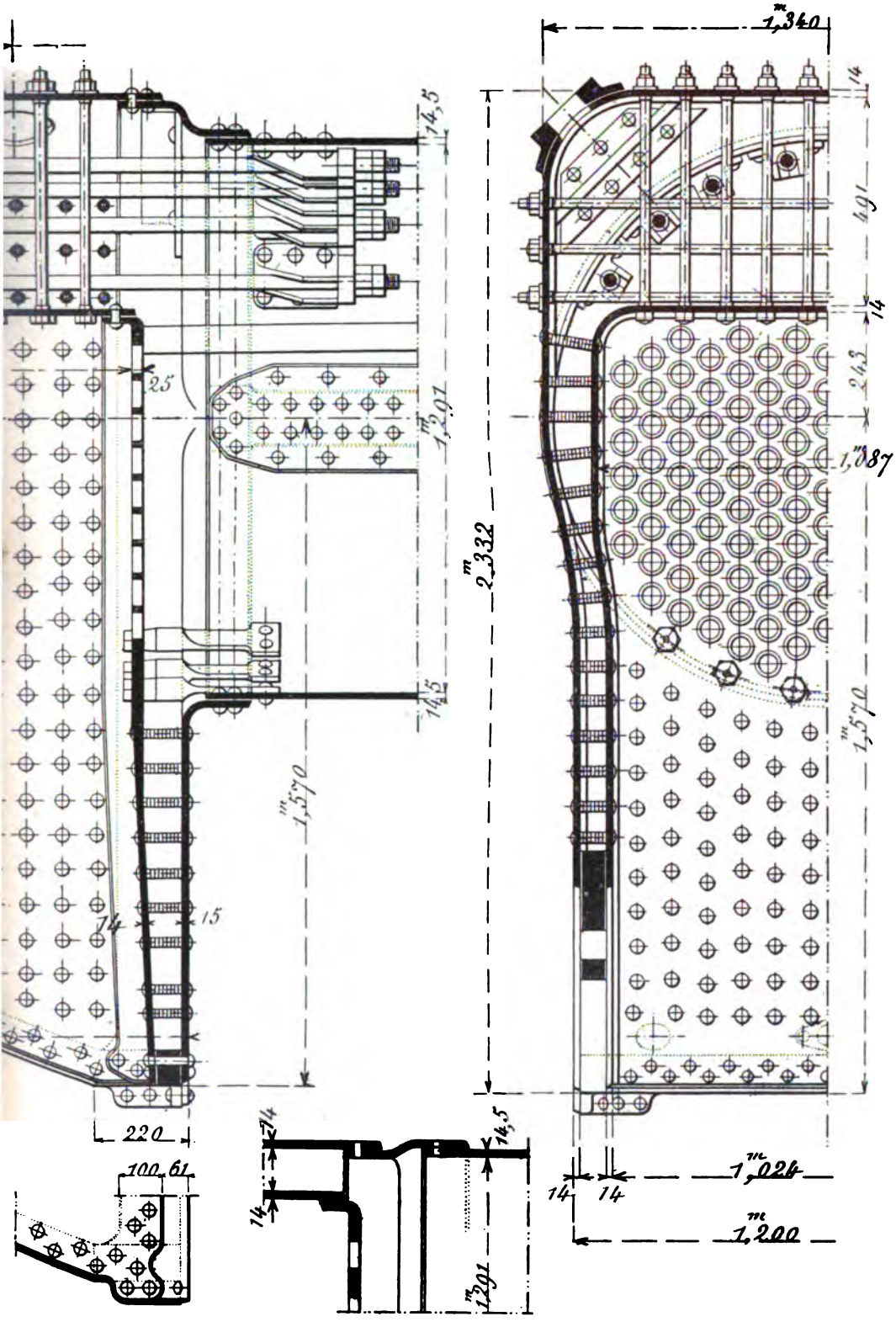


Fig. 367. — Boite à feu (type Belpaire) des locomotives co



and à grande vitesse (série C-21-60) des *Chemins de fer P.-L.-M.*

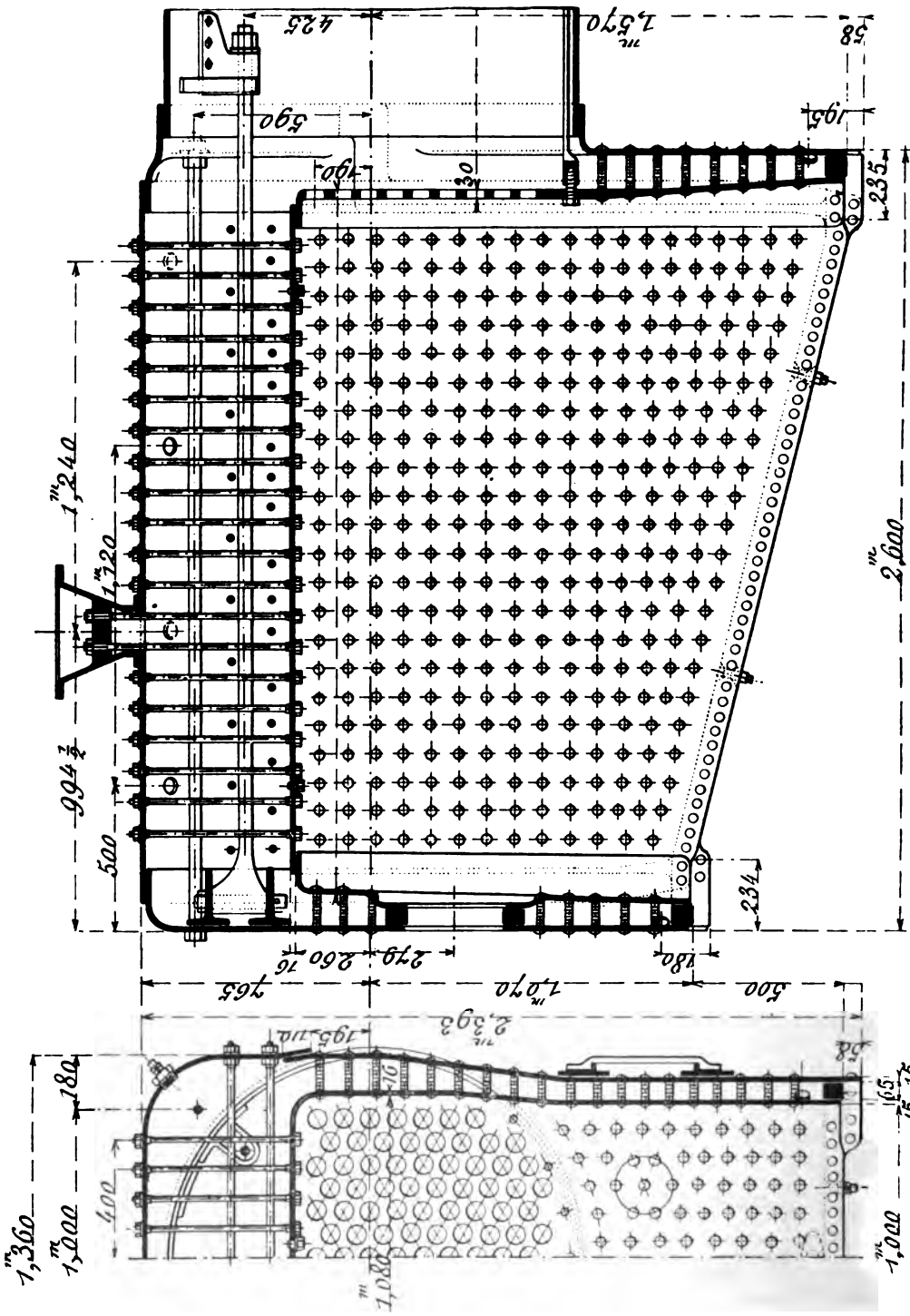


Fig. 368. — Foyer des locomotives compound à grande vitesse (série 1751-1762) des *Chemins de fer du Midi.*

rapidement, ce qui réduit encore, par la masse plus grande des obstacles qui en résulte, la surface libre de dégagement.

D'autre part, le foyer Belpaire présente quelques inconvénients relatifs. Il est plus compliqué que le foyer Crampton à tirants et un peu plus lourd puisqu'il comporte, en sus, les tirants transversaux, et que le plus grand développement des tôles d'enveloppe compense en partie la moindre épaisseur qu'on peut leur donner. Comme ce dernier type de foyer, il ne se prête pas aux dilatations et au soulèvement du ciel et, comme tel, convient surtout aux foyers de faible profondeur dans lesquels l'effet des dilatations est moins marqué. On doit d'ailleurs, autant que possible, le munir à l'avant de deux rangées de tirants à dilatation (fig. 376). A ce point de vue, il est inférieur aux fermes.

On peut simplifier et alléger la boîte à feu Belpaire en raccordant les parties supérieures du foyer et de son enveloppe par des arrondis de grand rayon qui, donnant aux portions latérales une forme capable de résister par elle-même à la pression de la vapeur, permet de réduire le nombre des rangées de tirants. Cette disposition est très avantageuse quand on peut l'appliquer sans réduire par trop le nombre des tubes : elle a été employée par la *Société alsacienne*, particulièrement pour des chaudières de locomotives à voie étroite.

En résumé, on peut considérer que les armatures par tirants sont plus légères que les fermes ; elles se prêtent moins facilement aux dilatations et sont en général d'une exécution plus difficile et demandent plus de soins ou d'attention.

La suppression des fermes et l'allégement qu'elle entraîne ne présentent aucun avantage pour les locomotives à foyer profond plongeant entre deux essieux accouplés, qui manquent toujours de poids sur l'arrière et auxquelles on est souvent amené à ajouter un lest en fonte sous la plate-forme. Il est donc naturel que les Anglais, qui ne construisent pas de machines d'autres types, soient restés fidèles aux fermes en long malgré leur poids.

199. Armaturage direct du ciel. — On a eu l'idée, il y a longtemps déjà, de se dispenser des armatures par poutrelles ou tirants en donnant au ciel une forme susceptible de résister par elle-même à la pression de la vapeur. En cintrant le ciel suivant un demi-cercle, on le constitue d'une série d'éléments capables de supporter cette pression sans fléchir, mais manquant encore de raideur dans le sens des génératrices. On a eu parfois recours, pour effectuer cette consolidation, à l'emploi de foyers en acier ondulé du genre Fox, cylindriques (Strong, Webb), ou demi-cylindriques comme on le voit figure 369 qui représente la disposition appliquée aux *chemins roumains*. Ces dispositions ne paraissent pas, jusqu'ici, avoir été couronnées de succès, elles ne

se sont en tout cas pas généralisées. La *Compagnie de l'Est* a constitué

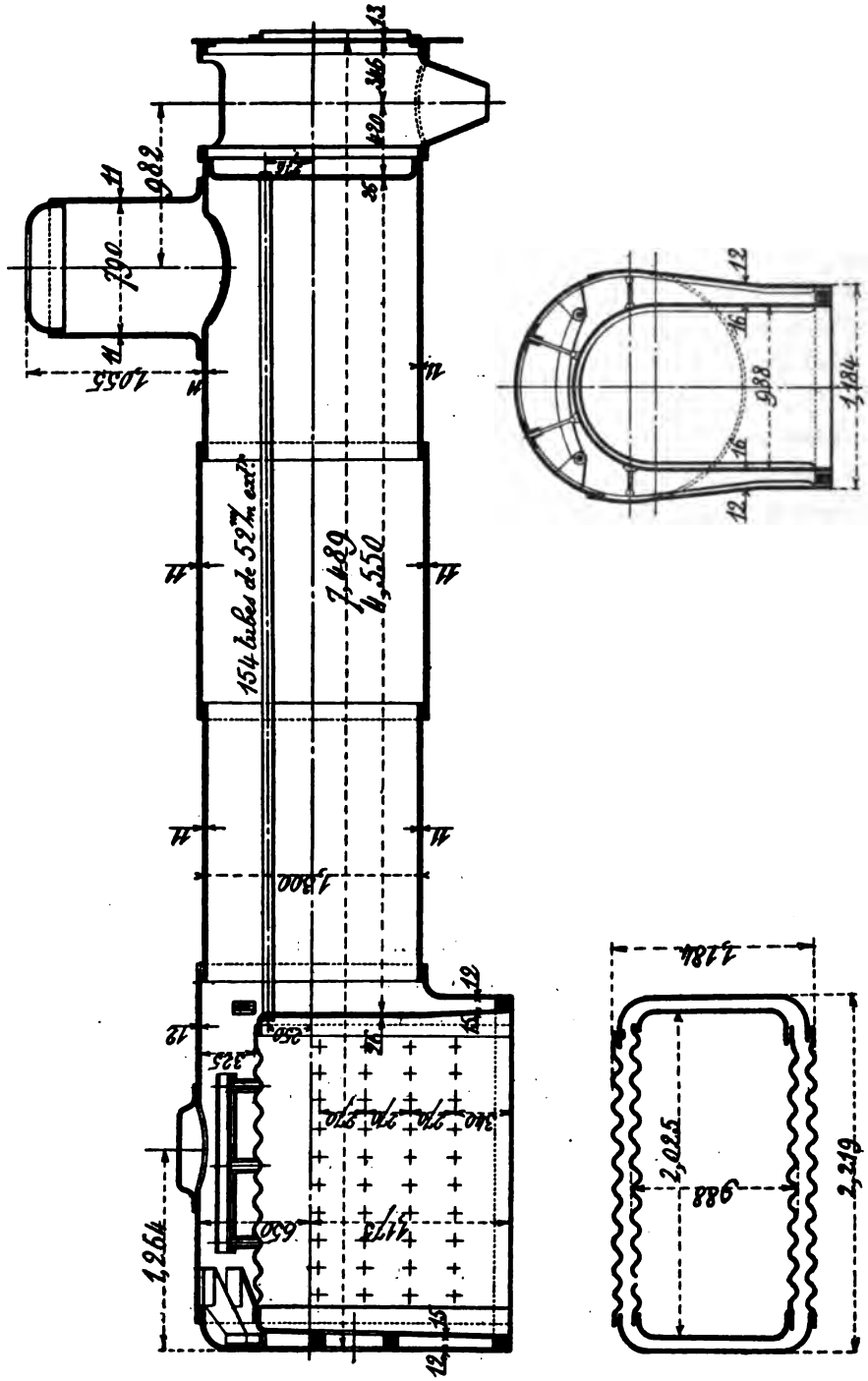


Fig. 369. — Chaudière à foyer ondulé des *Chemins de fer roumains.*

les foyers de ses premières machines express à chaudières Flaman de

parois verticales et planes en cuivre, auxquelles était rivé un ciel en acier ondulé, cintré suivant un demi-cercle, et consolidé par des tirants articulés. Cette disposition a été abandonnée dans les séries suivantes des machines du même type.

La *Compagnie d'Orléans*, qui emploie d'une manière générale les fermes supportées, a appliqué à quelques machines un dispositif dû à M. l'ingénieur en chef E. Polonceau et qui consiste dans l'adaptation, aux locomotives,

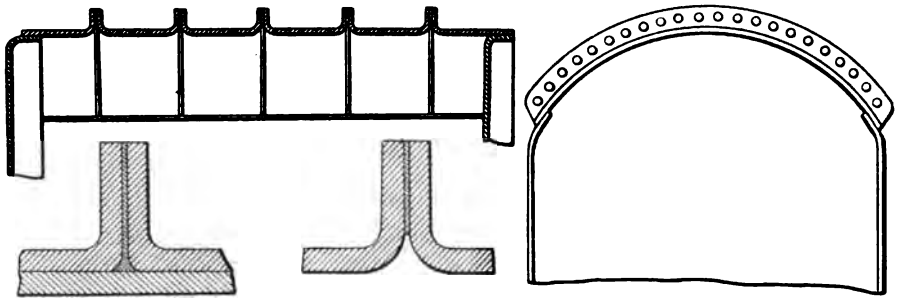


Fig. 370. — Consolidation directe du ciel ; système E. Polonceau.

d'un système de consolidation analogue à celui qui était usité pour les foyers cylindriques des chaudières marines avant l'introduction des foyers ondulés. Le système E. Polonceau (fig. 370) consiste dans l'emploi de pièces en cuivre rouge cintrées en arc de cercle et présentant une section à U, assemblées, après dressage, par leur bords relevés qui forment nervures. Cette disposition permet de donner au ciel la raideur nécessaire pour résister à la pression et les rivures d'assemblage peuvent être faites avec la riveuse hydraulique. Ce système revient en somme, mais avec plus de simplicité, à celui qui comporte des fermes en travers non supportées. Il se prête parfaitement aux dilatations et à la vaporisation, le ciel étant dégagé de tout obstacle; les rivets ne sont pas exposés à l'action du feu; le nettoyage du ciel est facile si l'on a disposé des regards sur les côtés du foyer. Enfin ce système de construction est simple et léger.

On trouvera figure 371 la disposition d'ensemble du foyer de la machine type 103.

Pour éviter la fatigue du cadre exposé à la charge qui presse sur le ciel des foyers à armaturage direct, on peut, si on le juge nécessaire, relier les nervures des plaques du ciel au berceau par quelques tirants articulés, c'est ce qui a été fait dans la chaudière de l'*État roumain* citée plus haut.

Le principal inconvénient des foyers formant eux-mêmes armatures consiste dans la forme cintrée qui leur est donnée, le ciel ne pouvant se trouver plus haut que dans les foyers ordinaires, ce qui réduit la surface

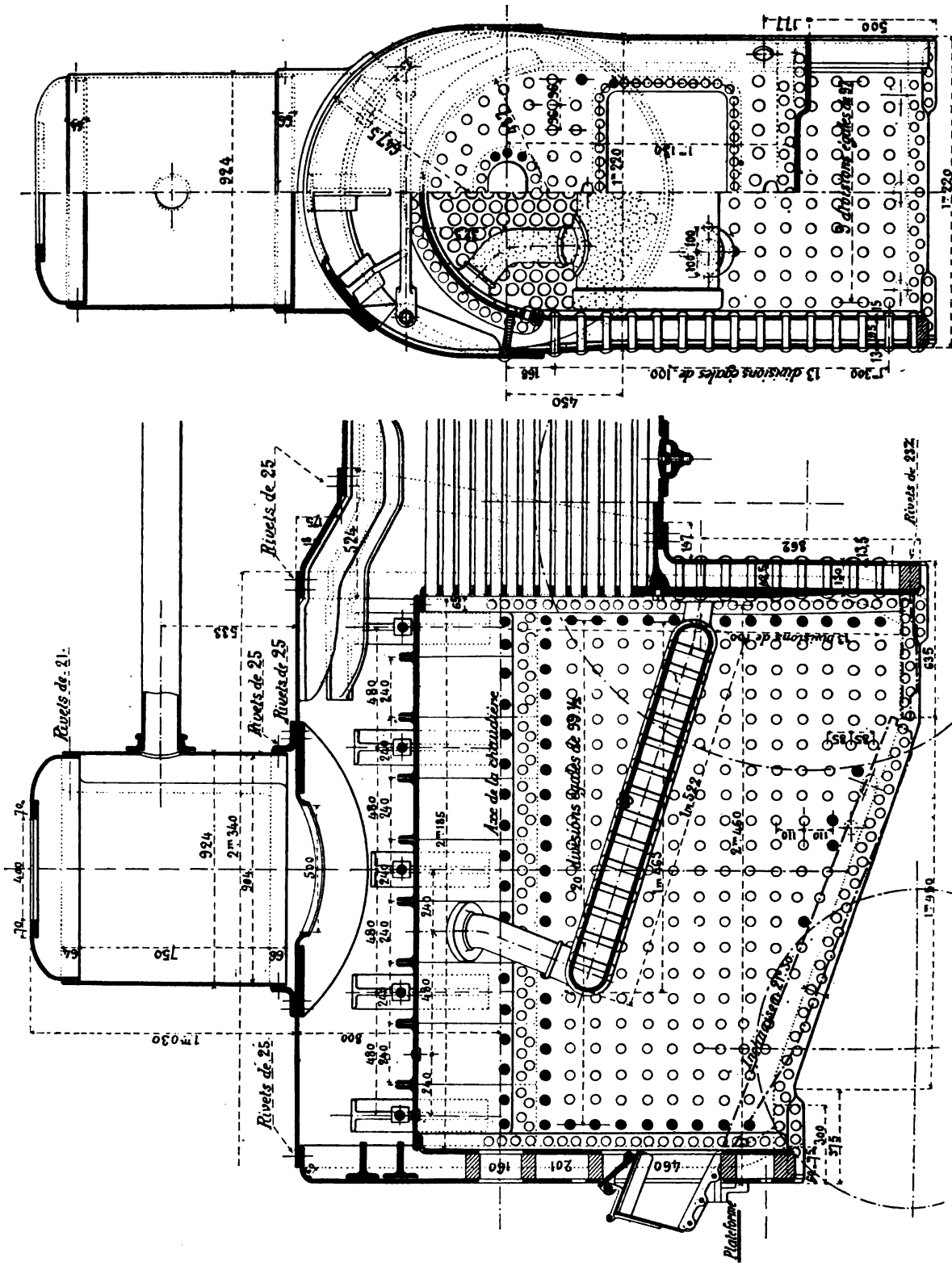


Fig. 371. — Boîte à feu et foyer (type E. Polonceau) de la locomotive à grande vitesse n° 103 du *Chemin de fer d'Orléans*.

de la plaque tubulaire avant (les coins étant supprimés) et ne permet pas l'installation d'un aussi grand nombre de tubes.

200. Tirants et vis de foyers. — L'écartement des vis et des tirants de ciel de foyer doit être, afin de ne pas multiplier leur nombre, aussi grand que le permet l'épaisseur des plaques eu égard à la pression de régime. Un trop grand rapprochement des tirants, outre qu'il augmente le prix du foyer, donne lieu à des incrustations plus gênantes qui viennent recouvrir le ciel sur une certaine épaisseur à la base de ces tirants et y adhèrent fortement. Cet écartement d'axe en axe n'est jamais inférieur à 90 mm. et reste généralement compris entre 100 et 120 mm., il atteint exceptionnellement 130 mm. C'est aussi celui des vis quand le ciel est consolidé par des fermes. L'entraxe de ces dernières ou l'écartement d'axe en axe des files longitudinales de vis est généralement un peu supérieur à celui des vis de la même file quand ce dernier est très faible et compris entre 90 et 100 mm., afin que l'espace resté libre entre les poutrelles soit assez grand pour que la vaporisation puisse s'effectuer librement.

Le diamètre des tirants verticaux est proportionnel à la pression et à leur espacement; il varie entre 20 et 30 mm. au fond des filets. Dans les foyers Belpaire de construction récente, ce diamètre est ordinairement compris entre 23 et 26 mm. Les tirants transversaux ont de 28 à 35 mm.

Le diamètre des axes d'articulation, des tirants à dilatation ou des supports de fermes varie de 25 à 35 mm.

Les ruptures des tirants sont infiniment plus rares que celles des entretoises puisqu'ils n'ont pas à supporter les mêmes flexions alternatives, aussi la plupart des Compagnies se dispensent-elles de les forer suivant leur axe. Toutefois, exception doit être faite pour la *Compagnie de Lyon* qui perce les tirants verticaux et transversaux des foyers Belpaire, suivant toute leur longueur, d'un trou bouché du côté extérieur (fig. 373).

Les vis, tirants ou boulons qui relient le ciel aux poutrelles, aux étriers de suspension ou au ciel, doivent présenter une étanchéité parfaite, assez difficile à réaliser à cause des hautes pressions, mais surtout des températures élevées et variables auxquelles sont sujets les foyers de locomotives.

Grâce à un serrage énergique, et à un excellent ajustage, on peut parfois se dispenser, comme le montre la figure 372 relative à une disposition adoptée par un atelier anglais, de tarauder le ciel; l'étanchéité est obtenue au moyen d'un cône arrondi, reliant la tête inférieure du boulon au corps, et qui est forcé, par le serrage, à l'intérieur du trou cylindrique du ciel.

Au *London Chatham*, M. Kirtley a remplacé avantageusement la disposition de la figure 372 (1) par celle de la figure 372 (2). Il a supprimé la cale placée entre le ciel et la ferme et sur laquelle se faisait le serrage, mais qui

gênait le dégagement de la vapeur ; en vissant la vis d'attache dans le ciel, l'étanchéité a été plus satisfaisante que dans la première disposition. La suppression de ces cales ou des bossages des poutrelles serait un grand avantage et mettrait presque, au point de vue de la facilité de vaporisation et de dégagement du ciel, les consolidations par fermes sur le même pied que les consolidations par tirants. Cette disposition a été réalisée dans les

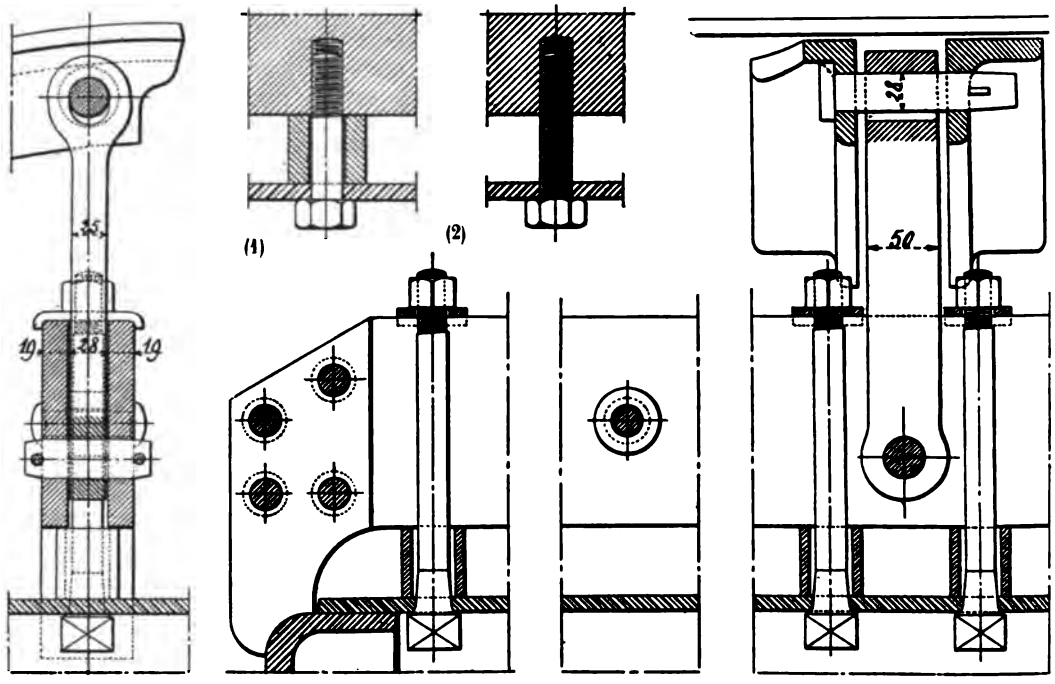


Fig. 372. — Fermes à deux flasques avec suspension ; les boulons fixant le ciel aux poutrelles ne sont pas vissés dans la plaque. Disposition anglaise.
(D'après le *Railway Engineer.*)

machines de l'*État russe* (fig. 350) (3) avec d'autant plus d'efficacité que les fermes ont été relevées et placées à 0,115 au-dessus du ciel.

En règle générale, les vis d'attache et tirants doivent être vissées dans le ciel, c'est le seul moyen de garantir l'étanchéité. Pour la compléter, la *Compagnie de Lyon* fait tracer, sur la face supérieure des écrous de tirants du foyer, une petite gorge annulaire (fig. 373) dans laquelle le cuivre, qui est mou, vient s'incruster.

Le *North Eastern* (fig. 374) et quelques constructeurs américains (fig. 377) placent une rondelle en cuivre rouge sous la tête de la vis et du tirant. Cette disposition est surtout utile pour les foyers en acier.

Autant que possible, pour ne pas augmenter la grosseur des tirants à leur base reposant sur le ciel, et ne pas gêner la vaporisation, autant que pour ne pas créer de surépaisseur de métal vis-à-vis de points fortement chauffés,

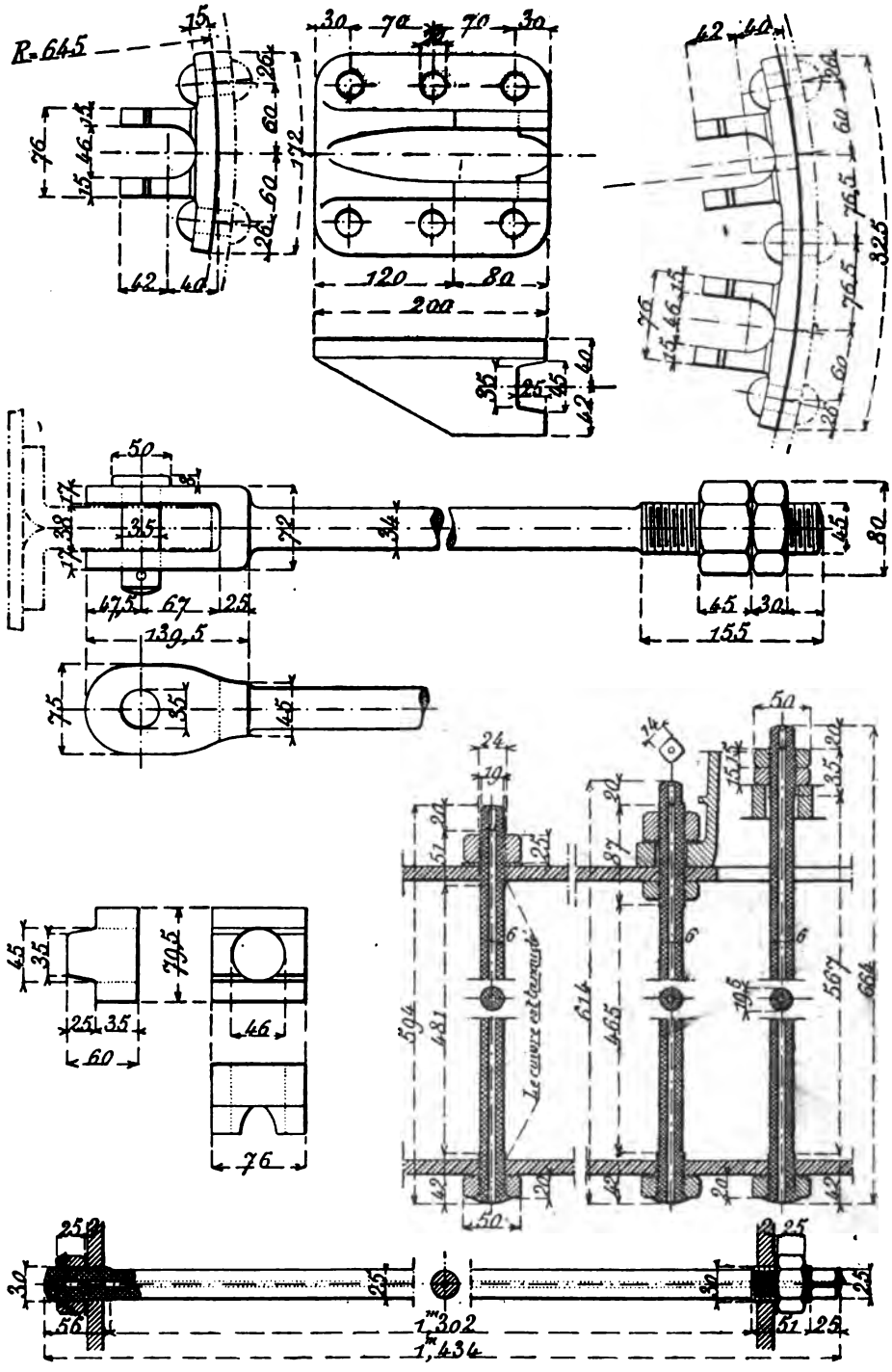


Fig. 373. — Tirants verticaux et horizontaux des foyers Belpaire des locomotives à grande vitesse (C-21-60) des *Chemins de fer P.-L.-M.*, et attaches, sur le corps cylindrique, des tirants longitudinaux. Les tirants verticaux et transversaux sont percés d'un trou central, comme les entretoises, destiné à révéler les cassures qui peuvent se produire. Ces trous débouchent dans le foyer pour les premiers; ils sont bouchés, du côté extérieur, par une olive en fer, entrée au marteau.

on ne place pas de contre-écrous aux tirants verticaux (fig. 373, 375). La *Compagnie de Lyon*, d'ailleurs, n'en place pas non plus aux tirants transversaux, tandis que la *Compagnie du Nord* en met (fig. 375). Quand les tirants sont à dilatation, on juge ordinairement nécessaire de placer un écrou intérieur sur chaque tirant, le ciel étant ainsi serré entre deux écrous, ou entre un écrou et une tête (fig. 378).

En France, les tirants verticaux et transversaux, filetés aux deux extrémités sont maintenus par des écrous extérieurs, ce qui permet leur démontage facile. On doit conseiller de placer sous ceux de ces écrous qui sont en contact avec l'enveloppe, en fer ou en acier, une rondelle en cuivre rouge qui est une garantie d'étanchéité et facilite les démontages en réduisant l'adhérence de l'écrou et diminue les chances de corrosion.

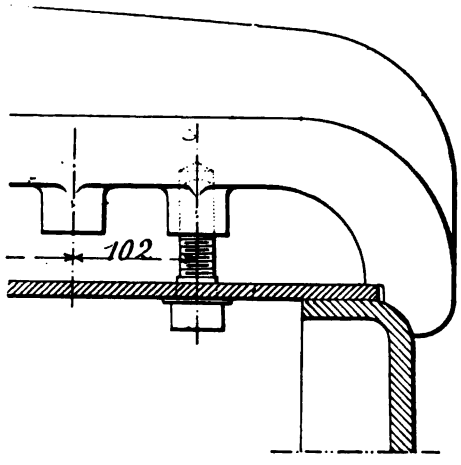


Fig. 374. — Fermes des locomotives du *North Eastern Railway*.

Beaucoup de constructeurs américains placent les tirants comme les entretoises latérales du foyer et les rivent aux deux bouts (fig. 377).

La figure 341 (1) représente les tirants verticaux du ciel de foyer des locomotives de banlieue de la *Compagnie de l'Est*, à boîte à feu Crampton. Ils sont vissés dans les deux plaques et portent des écrous extérieurs à chaque bout. A leur partie haute, ils reposent sur des cales coupées en sifflet ayant pour but de compenser l'obliquité de l'enveloppe.

La figure 375 représente les tirants verticaux et transversaux des foyers Belpaire appartenant aux locomotives compound à quatre cylindres construites par la *Société alsacienne* (série 2138-2157).

La figure 373 représente les tirants verticaux, transversaux et longitudinaux des foyers Belpaire appartenant aux locomotives express compound de la *Compagnie de Lyon* (série C-21-60).

Les prescriptions de cette Compagnie au sujet des tirants de foyers sont les suivantes :

Les tirants en acier sont percés sur toute leur longueur d'un trou bien rectiligne et bien centré de 6 mm. de diamètre.

Les extrémités renflées sont filetées de manière qu'elles fassent pour ainsi dire partie de la même vis dont les filets seraient enlevés au tour sur toute la longueur du corps.

De même, les plaques à réunir sont percées au foret, puis taraudées de

manière qu'elles fassent pour ainsi dire partie d'un même écrou dont la portion correspondant à leur intervalle aurait été enlevée.

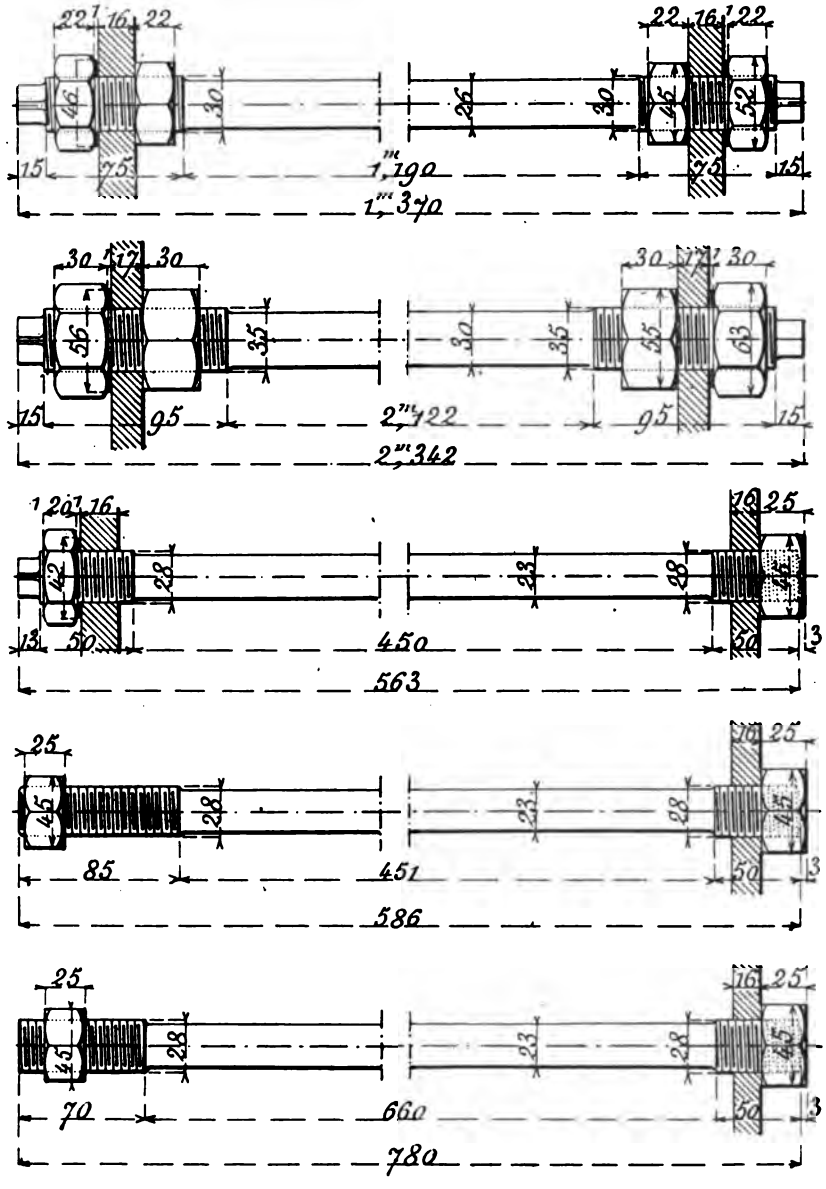


Fig. 375. — Tirants verticaux et horizontaux des foyers Belpaire des locomotives à grande vitesse du *Chemin de fer du Nord* (2121-2157).

Les tirants en acier sont fortement vissés dans les deux plaques.

En ce qui concerne les tirants verticaux, l'écrou intérieur porte à sa base une petite gorge dans laquelle le métal du ciel de foyer s'imprime, de manière que le serrage rende le joint bien étanche; il est fraisé à son sommet, et

l'extrémité du tirant est légèrement écrasée au marteau, de manière à remplir la fraisure.

L'écrou extérieur de tous les tirants est muni d'une rondelle en cuivre rouge recuit, destinée à assurer l'étanchéité du joint par serrage.

Après la pose, les trous des tirants sont bouchés par l'extérieur à l'aide d'un bouchon conique en cuivre rouge de 6,5 à 7 mm. de diamètre au maximum.

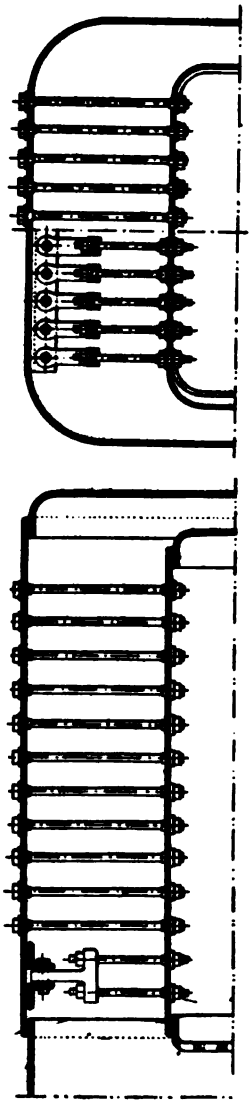


Fig. 376. — Disposition générale des tirants verticaux d'un foyer du type Belpaire (*M. Sh. and L. Ry*). Les deux rangées voisines de la plaque tubulaire sont à dilatation.

201. Tirants à dilatation. — Nous avons vu que beaucoup d'ingénieurs reconnaissaient la nécessité de disposer les armatures de telle manière que le ciel put se soulever légèrement sans rencontrer de résistance quand, au début du chauffage, le foyer se dilate plus que l'enveloppe extérieure. Avec les fermes et les consolidations par tirants articulés, la dilatation est entièrement libre ; il n'en est pas de même avec les tirants vissés à la fois dans le ciel du foyer et dans le berceau, qui maintiennent invariable l'écartement des deux plaques. Nous avons vu que quelques constructeurs étrangers consolidaient tout le ciel avec des tirants à coulisse (fig. 363) que d'autres appliquent seulement vers l'extrémité antérieure, dans le voisinage de la plaque tubulaire (fig. 361, 362). Beaucoup de constructeurs disposent, dans les foyers Belpaire, deux rangées de ces tirants à l'avant (fig. 376).

Les tirants à dilatation appartiennent à plusieurs catégories que nous allons examiner. Ils sont d'ailleurs de construction très simple.

Certains de ces tirants se composent de deux parties dont l'une coulisse à l'intérieur de l'autre, composant un système susceptible de se raccourcir, mais qui ne peut s'allonger. On trouvera figure 377 un tirant de ce genre d'un modèle usité aux États-Unis ; la portion inférieure est vissée et rivée au ciel et, à sa partie supérieure, à un étrier que supporte un boulon, solidaire du berceau, sur lequel il peut coulisser, la tête de ce boulon formant la liaison inférieure rigide dans un sens seulement.

Dans la seconde disposition (fig. 377), l'armature fixée au ciel est rattachée au tirant vissé au berceau par une clavette transversale passant dans une

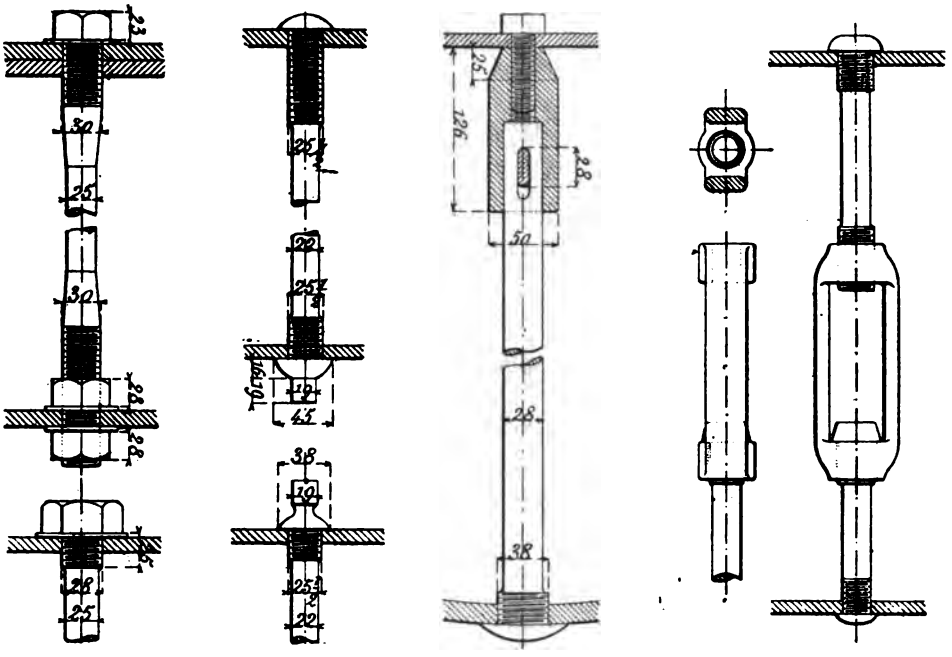


Fig. 377. — Types de tirants de ciel de foyer, rigides et à dilatation.

ouverture ayant, à sa partie supérieure, lorsque le foyer est dans sa position normale, quelques millimètres de jeu.

La figure 378 donne en élévation et coupe longitudinale la disposition générale des tirants mobiles appliqués à beaucoup de foyers Belpaire et Crampton; nous avons choisi comme exemple les tirants des chaudières des machines express de l'*Etat belge*. Les boulons, solidaires du foyer, sont vissés dans le ciel et maintenus par un écrou de chaque côté ; ils portent un autre écrou à leur partie supérieure qui repose sur le haut d'une pièce en T renversé, percée de deux trous recevant chacun, avec un jeu de 2 mm., un de ces tirants. Le T est supporté sur l'enveloppe de la boîte à feu par un autre T rivé à celle-ci et qu'il embrasse par une fourche à œil. On voit que ces tirants peuvent se soulever avec le foyer sans rencontrer d'obstacle, mais qu'ils ne permettent pas l'affaissement du ciel.

L'avant du foyer est supporté par deux files transversales de ces tirants reposant deux à deux sur un support commun. On trouvera l'application d'une semblable disposition à la chaudière représentée figure 308.

MM. Stroudley et Yarrow ont employé, il y a longtemps déjà, des tirants de forme spéciale traversant à frottement doux une douille en bronze vissée dans

la tôle extérieure sur laquelle ils reposent extérieurement et dont ils peuvent se détacher, quand le soulèvement du foyer se produit. Un chapeau, égale-

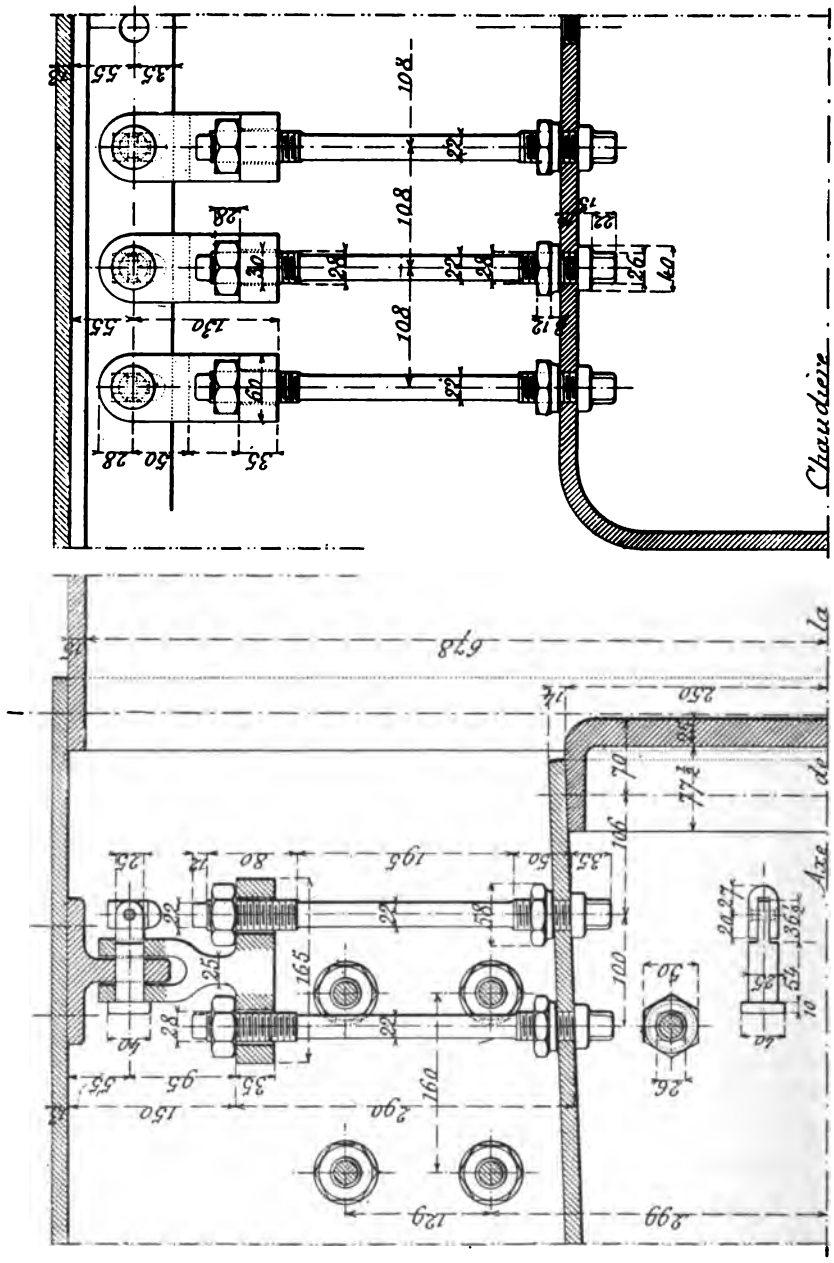


Fig. 378. — Tirants à dilatation placés à l'avant d'un foyer Belpaire (*État belge*).

ment en bronze et vissé sur l'extérieur de la douille, recouvre la tête du boulon ou l'écrou du tirant et empêche les fuites de vapeur. La figure 379 représente une variante de ce dispositif appliqué aux machines express à grande vitesse, à foyers Belpaire, du *Pensylvania RR.* (*Classe P*). Les deux ran-

gées voisines de la plaque tubulaire sont constituées de semblables tirants.

On trouvra figure 362 la disposition des tirants à étrier, montés sur deux rangées à l'avant des foyers des machines 3001-3005 de la Compagnie de l'Est.

202. Corps cylindrique. — Le corps cylindrique, ayant une section circulaire, est, par définition, capable de résister par lui-même à la pression intérieure sans qu'il soit nécessaire de lui mettre d'armatures; il constitue la partie la plus simple et la plus facile à établir de la chaudière.

Le corps cylindrique ou *tonne* se compose d'un certain nombre de viroles cintrées, juxtaposées et réunies par des rivets ; il est fixé, vers l'arrière, au berceau de la boîte à feu, directement ou par l'intermédieire d'une tôle emboutie et, vers l'avant, à la plaque tubulaire ou à la virole de boîte à fumée. Les tôles employées sont en fer de qualité supérieure ou en acier doux.

Les tôles constituant le corps cylindrique sont soumises, sous l'action de la pression, à un effort longitudinal, la tension intérieure tendant à séparer les deux fonds, et à un effort transversal par rapport à l'axe de la chaudière. Les tôles présentant, même quand elles sont en acier, une résistance légèrement supérieure dans le sens du laminage, on doit disposer les fibres dans la direction qui se trouve soumise au plus grand effort ; celui qui est exercé par l'action de la pression et qui tend à ouvrir les viroles étant de beaucoup le plus grand, on enroule toujours les viroles dans le sens de leur longueur. Leur largeur, et par conséquent le nombre des viroles dont le corps cylindrique peut être composé, dépend donc de la largeur des tôles que les usines métallurgiques sont en état de livrer couramment. Cette largeur a été augmentée dans ces dernières années, mais pas au point, à moins de très rares et coûteuses exceptions (quelques locomotives du *London and North Western Ry*), de manière à pouvoir composer le corps cylindrique d'une seule virole n'eût-il qu'une longueur extrêmement réduite de 3,00 m. Quand la tonne a moins de 4,00 m. de longueur, on peut aujourd'hui la former de deux viroles seulement (fig. 315, 317, 319, 324), mais on en emploie souvent trois (fig. 321, 323) surtout dans les chaudières en fer ; quand sa longueur atteint 5,00 m., on doit en employer au moins trois et parfois quatre. Ces viroles n'ont pas nécessairement la même longueur; l'une d'elles, qui ne sert alors que de raccord entre les autres, peut avoir une longueur très peu considérable. On peut être amené à adopter une longueur inégale, quand la position du dôme est fixée d'avance par une considération quelconque, une question de répartition par exemple. On trouvera figure 318 la coupe d'une chaudière américaine à *wagon-top*, dans laquelle le corps cylindrique, dont la longueur est de 3,40 m. environ, est constitué par une virole de 2,50 m. de largeur environ, rattachée au berceau par une virole conique beaucoup plus petite.

Les viroles sont enroulées à la machine à cintrer suivant un cercle aussi parfait que possible, ce qui est nécessaire pour qu'elles se trouvent en état d'équilibre intérieur sous l'action de la pression. Les deux extrémités sont reliées par une clouure à double rangée de rivets placés en quinconce. L'assemblage des deux pinces qui se rejoignent peut être fait par simple recouvrement (fig. 381) ou par couvre-joints (fig. 380). Dans la première disposition, les pinces sont déjetées un peu, l'une vers l'extérieur, l'autre vers l'intérieur, seul moyen d'obtenir que le cercle soit parfait. Si les deux pinces se rejoignaient simplement en se recouvrant, la virole serait légèrement ovale, ce qu'il faut éviter à tout prix au point de vue de la résistance. Ce système offre le maximum de simplicité et de légèreté, mais il est d'exécution assez délicate et nécessite de la part des ouvriers une certaine attention pour qu'il soit exécuté avec la précision nécessaire à son efficacité. En outre, lorsque les viroles sont en acier, on a tout à gagner à les travailler le moins possible. De plus, il faut étirer les pinces par le travers des joints transversaux comme on le voit figure 381 pour assurer en tous les points le collage des viroles, diminuer l'épaisseur du joint et permettre la mise en place du nombre voulu de rivets prenant les deux ou trois pinces superposées qu'il faut relier. Aussi, beaucoup de Compagnies préfèrent-elles, surtout avec les hautes pressions usitées actuellement, avoir recours à l'emploi de couvre-joints (fig. 382).

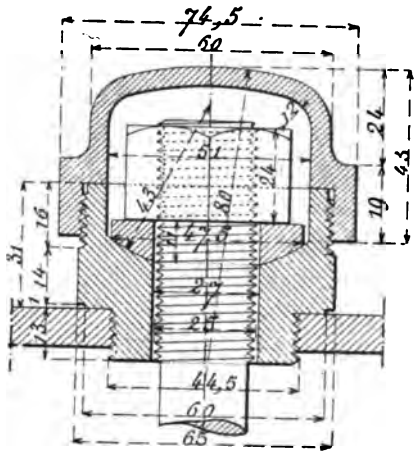


Fig. 379. — Tête de tirant à dilatation (*Pensylvania Railroad*).

Les deux pinces viennent se placer bout à bout et on les relie par deux couvre-joints placés, l'un intérieurement, l'autre extérieurement. On obtient ainsi facilement la cylindricité absolue du corps cylindrique. Il est inutile que les couvre-joints aient la même largeur. Dans l'assemblage représenté figure 380 (*Machines compound à grande vitesse de la Compagnie de Lyon*), le couvre-joint extérieur n'a que 0,130 m. de largeur et n'est traversé que par les deux files centrales de rivets ; le couvre-joint intérieur a 0,250 m. et se trouve traversé par les quatre rangées de rivets. Cette disposition évite l'emploi, pour toutes les files, de rivets longs et facilite le matage, tout en présentant une solidité satisfaisante. Les rivets des lignes extérieures sont deux fois plus espacés. Les extrémités des couvre-joints doivent être reliées aux clouures transversales de liaison entre les viroles juxtaposées, sous peine de créer des lignes de rupture et de rendre le

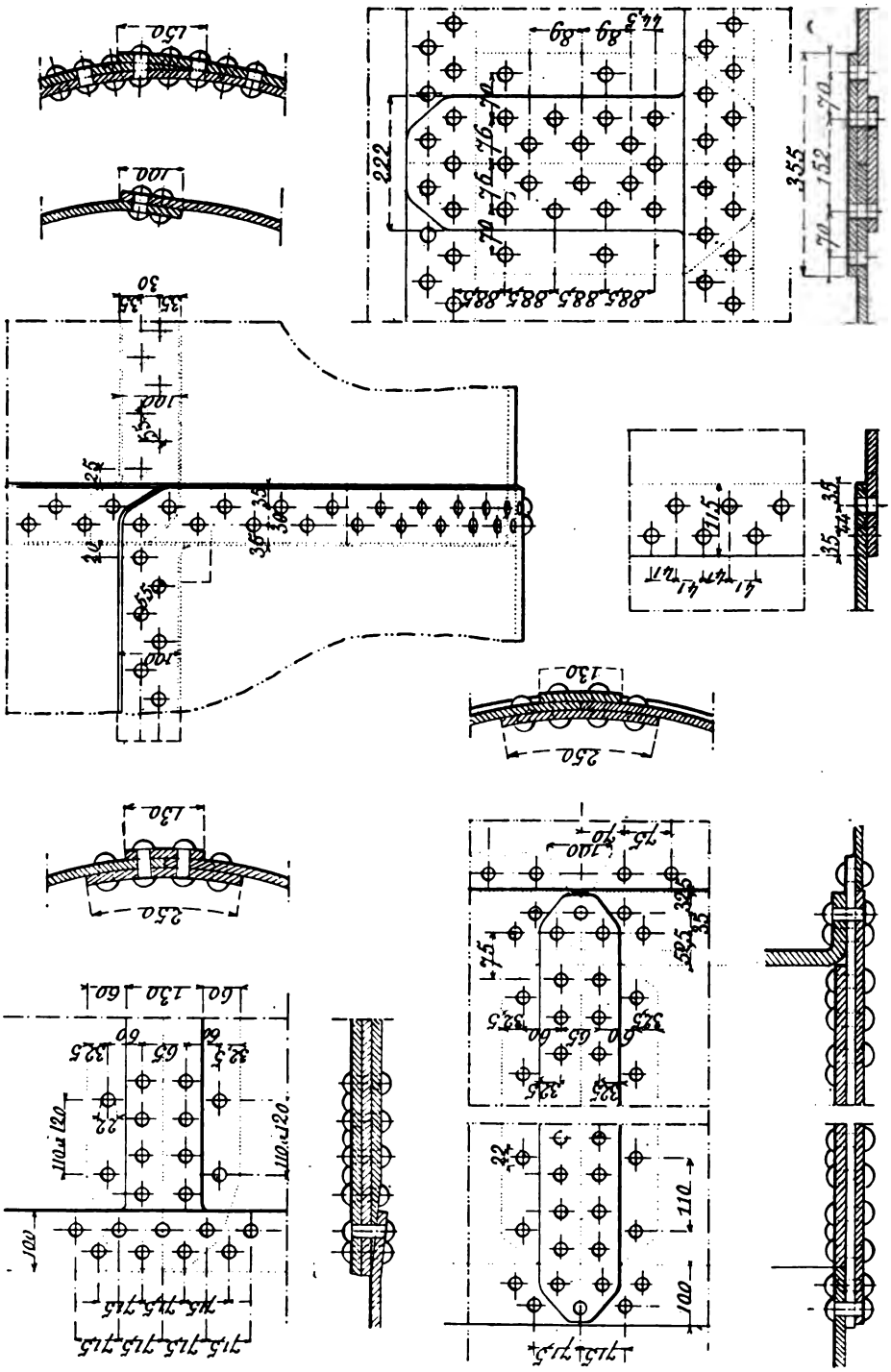


Fig. 380. — Types de cloures et de rivetage des viroles du corps cylindrique. Cloures à recouvrement (*Est*) et à couvre-joints (*P.-L.-M.*).

matage impossible. Un des couvre-joints s'étend au-dessus du joint transversal et l'autre est étiré pour pénétrer entre les deux pinces de ce joint.

Parfois on évite l'étirage et un seul des couvre-joints vient en recouvrement sur le joint transversal. Cette simplification s'impose en certains points, par exemple aux extrémités des joints par le travers de la plaque tubulaire ; cela n'a pas d'inconvénients, un seul des couvre-joints pouvant suffire à la

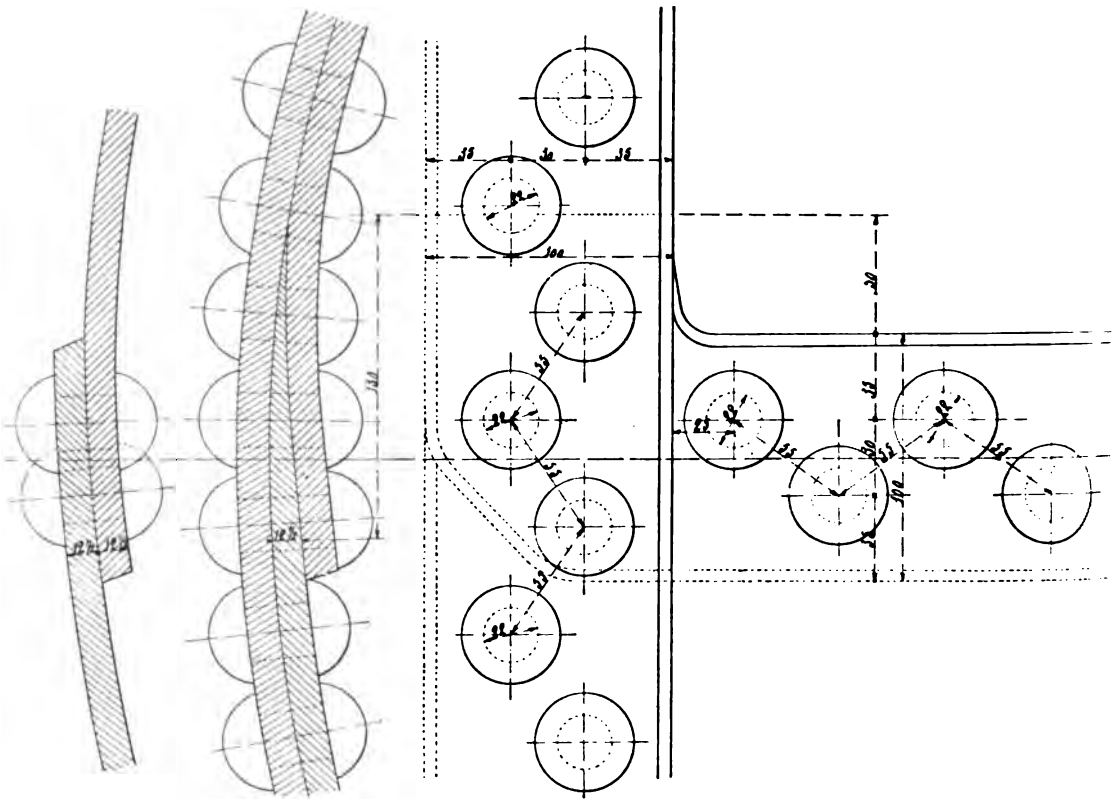


Fig. 381. — Détail du rivetage du corps cylindrique (*Est*).

rigueur s'il a l'épaisseur de la tôle. L'addition d'un second couvre-joint extérieur a surtout pour but d'empêcher les rivets de travailler en porte à faux et de faciliter l'étanchéité en recouvrant la jonction des deux tôles.

La figure 381 représente un détail du rivetage des locomotives du type 800 de la Compagnie de l'*Est*.

On trouvera figure 382 la disposition du rivetage et des couvre-joints dans les machines express du *North Eastern* (Classes Q et Q') timbrées à 12,65 kg. ; La tôle du corps cylindrique a 14 mm. d'épaisseur ; les clouures transversales sont à couvre-joints de 24 mm. Les clouures longitudinales ont des couvre-joints de 14 mm. en dehors et 11 mm. intérieurement. Le couvre-joint extérieur longitudinal vient buter contre le couvre-joint transversal, le couvre-joint intérieur longitudinal recouvre la clouure où il reçoit cinq rivets. Les rivets ont 22 mm. de diamètre et sont espacés de 51 mm. d'axe en axe.

Autant que possible, les joints longitudinaux des viroles doivent être placés au-dessus du niveau moyen, ce qui tend à diminuer leur attaque par corrosion; mais on ne peut toujours le faire, surtout avec les foyers Belpaire comme on peut s'en rendre compte par l'examen des figures 321 et 324 ; le couvre-joint de la virole arrière doit être nécessairement placé au-dessous de la zone où se trouvent les pattes d'attache des tirants de consolidation de la face arrière. Ordinairement, un des joints est placé sur le haut du corps cylindrique. Certains constructeurs anglais en profitent pour constituer avec le couvre-joint, élargi et étiré au marteau en forme d'anneau, la consolidation du trou du dôme. Cette disposition est visible sur la figure 315, qui représente une chaudière du *Caledonian Ry*.

De même, l'assemblage des viroles consécutives entre elles peut se faire par recouvrement ou au moyen de couvre-joints. Le premier système est de beaucoup le plus répandu, on en trouvera de nombreux exemples (fig. 315, 316, 317, 321, 322, etc.). Les deux viroles voisines sont emboîtées l'une dans l'autre de la quantité nécessaire pour la clouure, qui est à simple ou à double rang de rivets. Les pinces des joints transversaux sont amincies et étirées aux points de contact, de manière que cet emboîtage soit parfait et ne laisse pas un vide qui empêcherait d'obtenir l'étanchéité.

L'emboîtage peut être opéré de deux manières lorsque le nombre des viroles est de trois au moins ; il peut être alternatif, la virole intermédiaire étant d'un diamètre supérieur ou inférieur, de deux fois l'épaisseur des tôles, aux deux autres sur lesquelles elle s'assemble ; ou télescopique, les viroles étant de plus en plus petites et s'emmanchant successivement l'une dans l'autre ; la première, la plus grande des viroles, est placée soit près de la boîte à fumée (fig. 321, 322, 323), soit au contraire près du foyer (fig. 315, 316, 317).

La disposition que l'on doit adopter dépend généralement des conditions d'établissement de la machine. Ainsi, le télescopage à diamètre décroissant du côté de la boîte à fumée est à peu près généralement usité sur les locomotives anglaises, qui, ayant le foyer profond plongeant entre deux essieux accouplés, ont tendance à être trop chargées sur l'avant et insuffisamment à l'arrière ; on a donc intérêt à diminuer le diamètre de la chaudière à l'avant pour reporter vers l'arrière le centre de gravité. Le télescopage inverse a l'avantage contraire pour les machines qui manquent de poids sur l'avant ; en outre, il permet d'augmenter le diamètre du corps cylindrique à l'avant des roues motrices et qui, en ce point, n'en limitent plus l'élargissement. On peut ainsi augmenter légèrement le volume d'eau contenu dans la chaudière. Les chaudières des machines compound express des Compagnies du *Nord* et *du Midi* nous offrent un exemple de cette disposition (fig. 321, 323).

Dans les locomotives express du dernier type du *Pensylvania RR.*

(classe P), le corps cylindrique a un diamètre très considérable (1,60 m. à l'intérieur de la grande virole) ; pour alléger l'avant de la machine, la dernière virole est conique et se raccorde directement à la boîte à fumée cylindrique, qui n'a que 1,41 m. de diamètre. Cette disposition est fréquente aux États-Unis (fig. 319).

Un certain nombre de chaudières récentes ont leurs viroles assemblées par couvre-joints ; ces viroles sont placées bout à bout et réunies à chaque clouure par un anneau continu, alésé au diamètre extérieur de la tonne et formant couvre-joint, assez large pour recevoir, suivant les cas, une ou deux rangées de rivets. Cette disposition a été adoptée par exemple pour les locomotives express de l'*Etat belge* (fig. 309) du *North Eastern* (fig. 314) et pour les machines à six roues accouplées et à bogie de la *Compagnie de l'Ouest* (2301-2304) (fig. 324). Ce mode d'assemblage ne s'emploie qu'avec des joints transversaux également à couvre-joints. Celui de ceux-ci qui est intérieur vient à recouvrement sur la couture et y reçoit des rivets des deux rangées.

Les rivures transversales du corps cylindrique sont, en France, presque toujours à double rangée de rivets ; mais, en Angleterre et aux Etats-Unis, elles sont invariablement à simple rang.

L'épaisseur des tôles du corps cylindrique se calcule ordinairement d'après la formule usuelle $R = \frac{PD}{2e}$ dans laquelle, en France, on donne à R, résistance en pleine tôle, une valeur de 4,5 à 5 kg. pour le fer et de 5 à 6 kg. pour l'acier. En Angleterre et aux Etats-Unis surtout, où l'on préfère réduire le poids des machines, fût-ce aux dépens de leur durée et quitte à les renouveler plus souvent, on adopte un coefficient de sécurité moins élevé et on emploie des tôles notablement plus minces que chez nous et que sur le continent européen en général.

Les Américains ont même été un peu loin dans cette voie. Pour ne citer qu'un exemple, le corps cylindrique des chaudières en acier d'un des types d'express du *Pensylvania* ont un diamètre de 1,448 m. et l'épaisseur des tôles n'est que de 11 mm., bien que le timbre soit de 12,3 kg. Ces chaudières, à l'état neuf, offrent évidemment une sécurité suffisante, mais qu'une usure très faible réduit par trop. Ces faibles épaisseurs ne peuvent être admises que dans un pays où les visites et les lavages de chaudières se font avec une fréquence et un soin exceptionnels.

La *Compagnie du Midi* emploie la formule $e = 1,2\ dp$ pour les chaudières en fer et $e = 0,85\ dp$ pour les chaudières en acier. Comme plus haut, e est exprimé en millimètres, D en mètres, et p en kilogrammes par centimètre carré.

Les chemins de fer de l'*Etat belge* emploient la formule recommandée par les règlements de police : $et = pr$, e épaisseur des parois, t tension ou charge tangentielle, p pression intérieure en atmosphère, r rayon intérieur. Le coefficient de sécurité est fixé par le règlement de police qui stipule qu'aucune

TIMBRE; DIAMÈTRE ET ÉPAISSEUR DU CORPS CYLINDRIQUE
DANS QUELQUES MACHINES RÉCENTES

DÉSIGNATION DES MACHINES	DIAMÈTRE du corps cylindrique.	TIMBRE de la chaudière.	ÉPAISSEUR des tôles.
Ouest. Express à bogie, 963-990	1,287	12	17
— 6 roues accouplées à bogie, 2301-2304.	1,534 extérieur.	12	15 acier.
— 6 roues accouplées. Marchandises, 2245-2259	1,330	10	15
Nord. 4 roues accouplées. Banlieue, 2311-2360	1,300	10	14
— Express compound, 2138-2153	1,256	14	19
— 6 roues accouplées. Mixtes, 2453-3512	1,236	10	14,5
Est. Express à bogie, 813-840	1,168	12	12,5 acier.
— 6 roues accouplées. Banlieue, 705-742.	1,300	12	14,5 —
— 8 roues accouplées. Marchandises, 0564-0691	1,500	9	16
— 6 roues accouplées. Marchandises, type 1000	1,430	13	14,5 et 15 acier.
P.-L.-M. Express compound, C. 21-60.	1,320	15	14,5 —
— Express à bogie, B. 111-400	1,261	11	14,5
— 8 roues accouplées compound, 3211-3362	1,400	15	15 acier.
P.-O. Express, 51-76	1,250	10	14
— Express, 77-86	1,250	15	16 acier.
— Express, 101-102	1,250	13	16 —
— 6 roues accouplées. Marchandises, 942-996	1,38	8	13,5
Etat. Express	1,23	13	18
Midi. Express	1,28	12	13 acier.
Etat belge. Type 12	1,300 intérieur.	10,2	13 —
— Type 16	1,500	12	15
Great Western. Express à roues libres	1,270	11,25	11 acier.
Caledonian. Express à bogie	1,423	11,25	14 —
Lancashire and Yorkshire. 4 roues accouplées	1,270	11,25	13 —
Midland. Express à roues libres	1,245	11,25	13
North Eastern. Express compound	1,321 intérieur.	14	14 acier.
London and N.-W. Express compound	1,270	12	13 acier.
Philadelphia and Reading. Express compound	1,460	12,6	14 —
Baltimore and Ohio. Express compound	1,575	12,6	14 —
Central Railroad, of N.-J. Express compound	1,473	12,6	14 et 16 —
New York Central. Express à bogie, 999	1,473	13,4	14,3 —
Pensylvania. 4 roues accouplées	1,448	12,3	11 —
Brooks	1,473	12,65	12,7 —
Erie. 10 roues accouplées	1,892	12,65	19 —
Chemins Méridionaux. Italie	1,330	10,2	14
Méditerranée. Italie	1,310	11,4	14
Société Austro-Hongroise. Autriche	1,280	10	13
Nord-Empereur Ferdinand. Autriche	1,300	12,4	14
Etat hollandais	1,318	10,3	14
Gothard	1,285	12,4	13,5 acier.
Etat roumain	1,290	10	13,5
Etat de Hanovre	1,400	12,4	14 acier.
Etat norvégien	1,245	12	14
Sud-Ouest russe	1,222	11,4	14
Vladicaucase	1,438	11,4	16

chaudière à vapeur ne peut fonctionner à une pression dépassant le quart de la pression qui ferait rompre quelqu'une de ses parties. La réduction de

COEFFICIENTS DE SÉCURITÉ DES TOLES DE CHAUDIÈRES

Pour les principales séries de locomotives de la compagnie de l'Est.

DÉSIGNATION des séries de locomotives.	NATURE des tôles.	TIMBRE de la chaudière.	DIAMÈTRE de la chaudière.	ÉPAISSEUR DES TOLES			FATIGUE DES TÔLES du corps cylindrique.				FATIGUE DES RIVETS		TENSION en pleine tôle sous les épreuves réglementaires.	
				Du corps cylindrique.	DE LA BOÎTE A FEU		EN PLEINE TÔLE		SUR LES LIGNES de rivure.		Diamètre des rivets.	Fatigue au cisaillement.	Pression à l'épreuve.	Tension des tôles.
					Fer.	Acier.	Tension.	Coefficient de sécurité	Tension.	Coefficient de sécurité				
		Kilogr.	M.	Millim.			Kilogr.		Kilogr.		Millim.	Kilogr.	Kilogr.	
189 à 222-243 à 258	Fer.	9	1,256	13,5	P.AV. 14,5 P.AR. 14 Env. 13,5	» » »	4,187	8,360	5,624	6,224	23	6,121	15	6,977
441 à 485	Fer.	10	1,256	14,5	P.AV. 15 P.AR. 15 Env. 14,5	» » »	4,331	8,081	5,817	6,016	23	6,802	16	6,929
543 à 562	Fer.	10	1,268	13,5	P.AV. 14,5 P.AR. 14 Env. 13,5	» » »	4,696	7,453	6,308	5,548	23	6,867	16	7,514
508 et 509	Acier (A). — (B).	12	0,800 1,200	9 12,5	» » »	P.AV. 15 P.AR. 13 Env. 12,5	5,333 5,760	7,875 7,292	7,164 7,737	5,863 5,429	23	5,199 7,798	18	8,000 8,640
684 à 692	Fer.	11	1,300	15	P.AV. 15,5 P.AR. 15 Env. 15	» » »	4,767	7,342	6,403	5,467	23	7,744	17	7,367
693 à 704 705 à 728	Acier.	12	1,300	14,5	» » »	P.AV. 15 P.AR. 15 Env. 14,5	5,379	7,806	7,260	5,785	23	8,444	18	8,070
801 à 812	Acier (A). — (B).	12	0,800 1,200	9 12,5	[illegible]	P.AV. 15 [illegible]	5,333 5,760	7,875 7,292	7,164 7,737	5,863 5,429	23	5,199 7,798	18	8,000 8,640

800 à 824	— (B).	12	1,168	12,5	»	P.AR. 15 Env. 12,5	5,606	7,487	7,577	5,541		7,728		6,409
1 000 et 1 001	Acier.	8,5	1,500	11	» » »	P.AV. 15 P.AR. 12 Env. 11	5,790	7,255	7,800	5,334	22	4,490	14,4	9,877
0526 à 0541	Fer.	9	1,500	15	» » »	P.AV. 15 P.AR. 15 Env. 13	4,650	7,527	6,562	5,335	23	7,520	15	7,783
0558 à 0563	Fer.	9	1,500	16	» » »	P.AV. 15 P.AR. 15 Env. 12	4,219	8,296	5,667	6,176	23	7,311	15	7,032
0564 à 0691	Acier.	9	1,500	16	» » »	P.AV. 16,5 P.AR. 16,5 Env. 16	4,219	9,952	5,667	7,410	23	7,311	15	7,032
0479 à 0500-0701 à 0766	Fer.	9	1,320	15	P.AN. 16 P.AR. 16 Env. 15	» » »	3,960	8,838	5,319	6,580	23	6,433	15	6,600
0479 à 0500-0701 à 0766	Acier.	12	1,320	15	» » »	P.AV. 15,5 P.AR. 15,5 Env. 15	5,280	7,953	7,094	5,920	23	8,976	18	7,920
1 002 à 1 005	Acier.	12 13	1,430 1,430	14,5 14,5	» » »	P.AV. 15 P.AR. 15 Env. 14,5	5,917 6,410	7,098 6,552	7,948 8,610	5,284 4,878	23	9,293 10,070	19	9,368

NOTA. — Dans les locomotives nos 508 et 509, 801 à 812 et 813 à 824, les chiffres des rangées A se rapportent au corps supérieur de chaudière.
— — — B — inférieur —

Dans les locomotives nos 0564 à 0691 avec chaudières en acier, le timbre qui aurait pu être élevé en raison du peu de fatigue des tôles a été conservé à 9 kg. en raison de la faiblesse relative des différentes pièces du mouvement.

Le coefficient de sécurité est le rapport de la charge de rupture à la fatigue de la tôle. Cette charge de rupture a été prise de 42 kg. par millimètre carré pour les tôles d'acier et de 35 kg. pour les tôles de fer.

résistance pour la rivure double avec couvre-joints intérieur et extérieur, usitée dans les dernières chaudières, est de 36,66 0/0. Le timbre varie de 8 à 12 kg. et l'épaisseur des tôles de 11 à 14 mm. La tension en pleine tôle sous l'épreuve préalable à la mise en service (1 1/2 fois la pression de marche) serait, pour une chaudière de 1,30 m. de diamètre, à tôles de 13 mm. et timbrée à 10 atmosphères $t = \frac{10 \times 0.1033 \times 1,5 \times 650}{13} = 7,45$ kg.

Nous avons, dans le tableau page 461, réuni quelques documents relatifs aux derniers types de machines construits dans différents pays et qui pourront fixer les idées sur les épaisseurs ordinairement admises pour les chaudières locomotives.

On trouvera, dans le tableau ci-après, quelques données numériques concernant la tension en pleine tôle et dans la rivure double sur les locomotives de la Compagnie d'*Orléans :*

NUMÉROS d'ordre.	SÉRIES DE LOCOMOTIVES	TENSION en pleine tôle à l'épreuve réglementaire.	COEFFICIENT de réduction de résistance dans la rivure double.
		Kilogrammes.	
1	201 à 212	11,32	0,746
2	213 à 234	11,32	0,746
3	2201 à 2203	11,20	0,757
4	1114 à 1140	12,79	0,769
5	181 à 200	11,32	0,746
6	171 à 180	11,32	0,746
7	235 à 254	11,32	0,746
8	255 à 264	11,32	0,746
9	1021 à 1030	10,73	0,769
10	1091 à 1100	10,06	0,769
11	1801 à 1825	9,80	0,724
12	101 et 102	7,42	0,714
13	171 à 264	8,20	0,740
14	2186 à 2190	7,71	0,714
	103	9,13	0,739

Le corps cylindrique est parfois muni, à sa partie inférieure, d'une cuvette de vidange en bronze ou en tôle emboutie, rivée sur la plus grande virole, et communiquant avec la chaudière par une ouverture de même largeur que sa base. Cette cuvette sert de réceptable aux boues qui peuvent se déposer sur le fond du corps cylindrique ; on les en extrait à l'aide d'un robinet de vidange spécial souvent manœuvrable du dehors.

203. Dômes. — Nous avons vu que l'on avait tendance à réduire le volume des dômes pour alléger les machines et à les considérer de plus en plus comme un simple logement du col de cygne du régulateur, la quantité dont ils peuvent accroître le volume de vapeur étant insignifiante et ne compensant pas, tant s'en faut, l'excédent de poids et de prix des grands dômes. A ce

point de vue, on tend à se rapprocher partout de la pratique anglaise qui n'a jamais admis que des dômes de très faible capacité. En Angleterre le diamètre des dômes ne dépasse pas 0,600 m. et descend parfois à 0,350 m. (*Brighton*, lignes écossaises) et leur hauteur à 0,600 ou 0,700 m. En France, on employait autrefois sur quelques réseaux des dômes dont le diamètre était peu inférieur à celui de la chaudière ; actuellement, on se limite dans les environs de 0,700 m. Seules, les *Compagnies de Lyon* et d'*Orléans* ont encore employé, dans leurs machines de construction récente, des dômes d'un diamètre de 0,900 m. environ et de 1,000 m. de hauteur totale. Les domes des très grosses chaudières des nouvelles locomotives à six roues accouplées (série 2301) de la *Compagnie de l'Ouest* n'ont que 0,775 m. de diamètre intérieur et une hauteur de 0,795 m. Les chaudières, également très volumineuses, des machines à marchandises récentes de la *Compagnie de l'Est* (série 1 000) ont des dômes de 0,718 m. de diamètre et 0,800 m. de hauteur.

La réduction du diamètre du dôme entraîne une double diminution de son poids par suite du moindre développement des surfaces et des épaisseurs plus faibles qu'on peut lui donner.

Les dômes, comme le corps cylindrique, se font en acier doux ou en fer et l'épaisseur de leurs parois peut se calculer de la même manière. D'ailleurs, cette épaisseur est extrêmement variable, en pratique, pour des pressions et des diamètres identiques. Ainsi, ceux des locomotives compound de la *Compagnie de Lyon* timbrées à 15 kg., qui ont 0,900 m. de diamètre, ont une épaisseur de 8 mm. seulement et ceux des machines 1 000 de la *Compagnie de l'Est*, timbrées à 13 kg., qui ont 0,718 m. de diamètre, ont une épaisseur de 9 mm., tandis que les dômes des chaudières des locomotives de l'*Ouest* (série 2 301) ont 14 mm. et ceux des machines de l'*Etat belge* (diamètre 0,680 m., timbre 10,2 kg.) 17 mm., alors que le corps cylindrique n'a que 13 mm. C'est que l'on fait intervenir des questions tout à fait étrangères à la résistance des matériaux, telles que les questions de répartition, de facilité de construction, de durée, etc.

Le dôme renferme toujours, soit le régulateur quand il est à col de cygne, soit le tuyau recourbé amenant la vapeur au régulateur quand celui-ci est du type Crampton. Il porte en outre parfois la cuvette des soupapes et comporte un couvercle ou une partie démontable servant de bouchon de trou d'homme.

Le dôme est cylindrique et fermé à sa partie supérieure par une calotte hémisphérique ou plate raccordée par des arrondis. Il est fixé sur le corps cylindrique en un point qui, nous l'avons vu, dépend en partie de la répartition ou, plus rarement, de considérations relatives à la vaporisation. Aujourd'hui, dans toutes les locomotives européennes, on place le dôme sur le corps cylindrique, sur la première ou la dernière virole ou sur la virole

milieu. Quelques constructeurs américains, employant le foyer à wagon-top, ou la *Compagnie d'Orléans* qui place maintenant deux dômes sur ses chaudières, font seuls exception à cette règle.

Le dôme communique avec la chaudière par une ouverture pratiquée dans

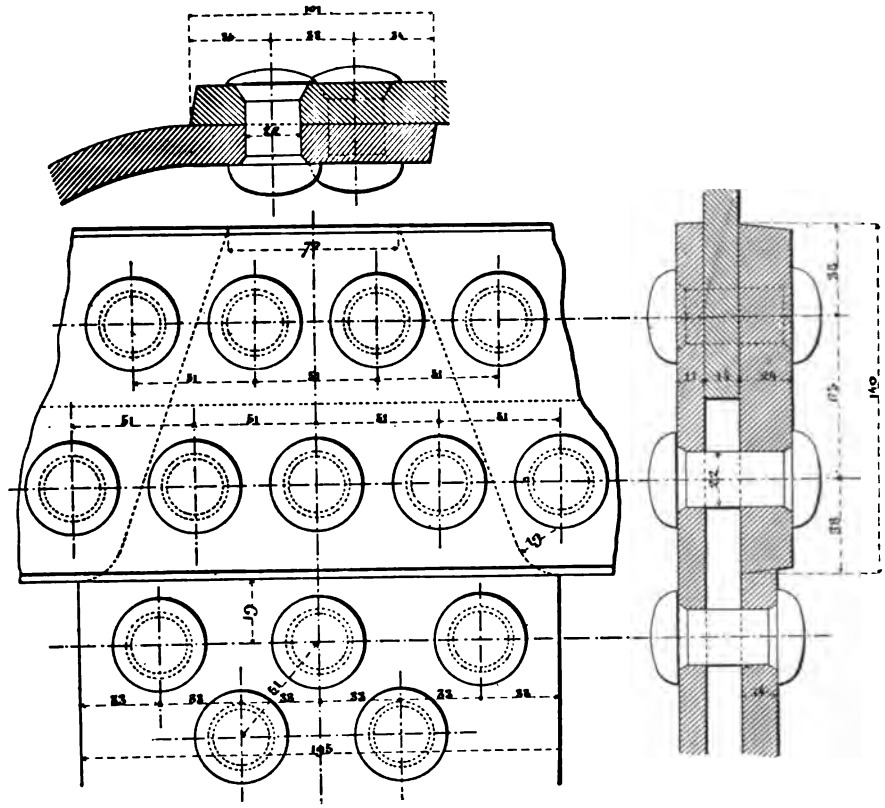


Fig. 382. — Détail du rivetage du corps cylindrique des locomotives à grande vitesse (type Q_1) du *North Eastern Railway*.

la tôle, à laquelle il ne faut pas donner autant que possible un diamètre supérieur à celui qui permet le passage d'un homme, le col de cygne étant en place (fig. 384). La plaie ainsi pratiquée dans le corps cylindrique constitue en effet un affaiblissement considérable de la virole, dans la zone circulaire correspondant à la coupure et il importe de lui donner la section minimum. D'ailleurs, on consolide cette région en doublant les parois de l'ouverture au moyen d'une tôle intérieure annulaire, soudée à ses abouts, qui peut avoir la même épaisseur que le corps cylindrique auquel elle est rivée à double rang. Cette tôle de consolidation s'étend jusque sous l'embase du dôme — qui contribue aussi à la consolidation dans une large mesure — dont les rivets la traverse. Dans la chaudière du *Caledonian Ry* représentée plus haut l'anneau de consolidation du dôme est placé extérieurement et

formé par le prolongement, élargi et troué en son centre, du couvre-joint supérieur de la première virole.

Quelques Compagnies anglaises font encore des dômes de petit diamètre en fonte (fig. 383), mais cette pratique n'est pas recommandable. Ces dômes sont lourds, présentent une sécurité insuffisante aux hautes pressions et risquent de se fendre au rivetage ; leur seul avantage réside dans la facilité de leur construction et leur faible prix. D'autres se contentent de faire la partie supérieure, supportant les cuvettes des soupapes, en fonte ; cette pratique est très suivie en Angleterre et aux États-Unis (fig. 386, 389).

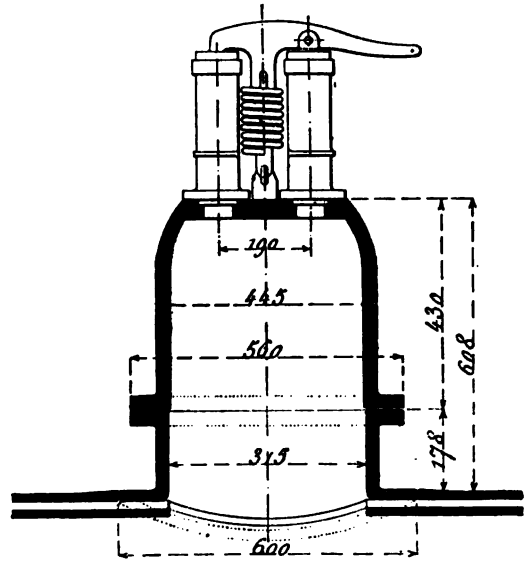


Fig. 383. — Dôme en fonte du *North British Railway*.

En règle générale, les dômes se confectionnent en tôle d'acier doux.

La figure 384 représente le mode de construction le plus répandu en France actuellement et que l'on retrouvera presque sans variante figures 322, 324 (*Ouest*, *P.-L.-M.*). La partie cylindrique du dôme est formée par une tôle cintrée suivant un cylindre aussi parfait que possible et dont les abouts sont reliés par une double rangée de rivets, par recouvrement ou par couvre-joint. La partie supérieure, reliée au cylindre par une simple rangée de rivets, est formée par emboutissage ; elle est annulaire et ses lèvres sont consolidées par une bande continue en tôle qui lui est rivée intérieurement. L'orifice central, formant trou d'homme, est bouché par une tôle plate ou bombée, dressée, circulaire, formant trou d'homme, fixée par une rangée de prisonniers. Quand le dôme porte les soupapes, ce couvercle, en fonte ou en bronze, est constitué par la cuvette (fig. 386). La partie cylindrique du dôme est rattachée à la virole de la chaudière par une embase emboutie dont les abouts sont soudés et qui est fixée par un simple rang de rivets.

On remplace quelquefois la partie emboutie du haut par une cornière cintrée continue (fig. 385 ; *Nord*).

Les Anglais emploient des dômes à bouts soudés et se dispensent presque toujours de rapporter l'embase inférieure qui est forgée directement sur la partie cylindrique (fig. 386). Leurs dômes ne comportent ainsi aucune rivure que celle qui les rattache au corps cylindrique. Cette pratique est aussi

très suivie en Amérique, mais parfois on consolide l'embase par une seconde tôle emboutie de même forme, placée intérieurement (fig. 316).

Parfois, le joint démontable est placé vers le milieu du dôme et constitué

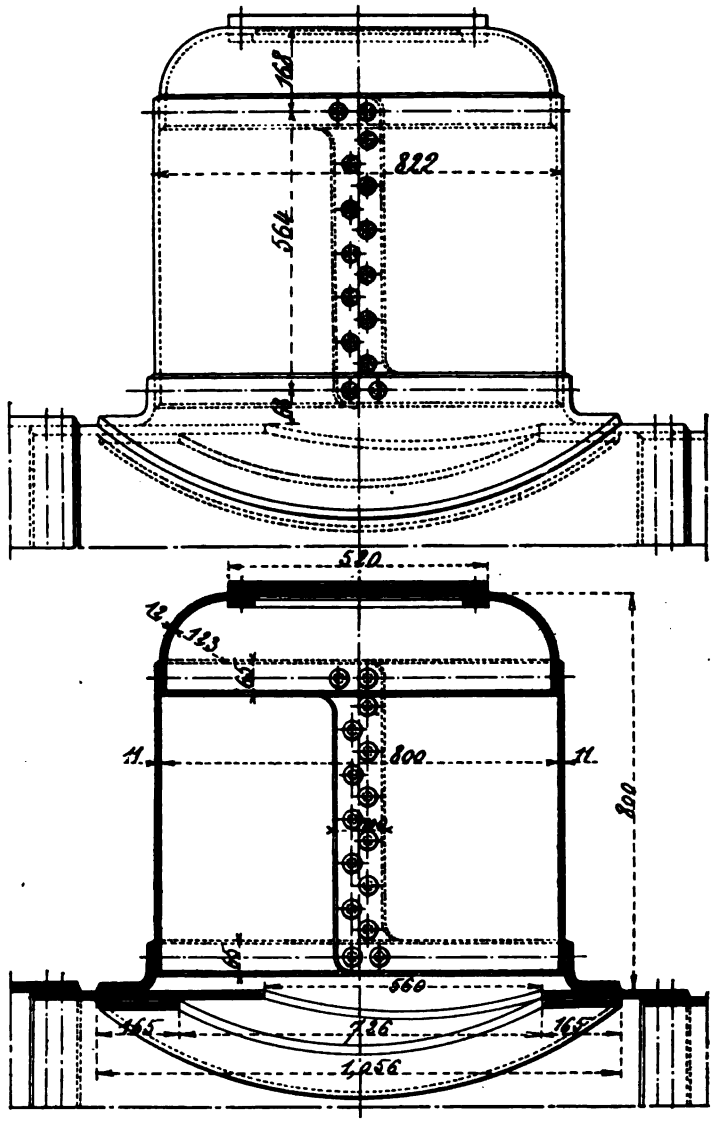
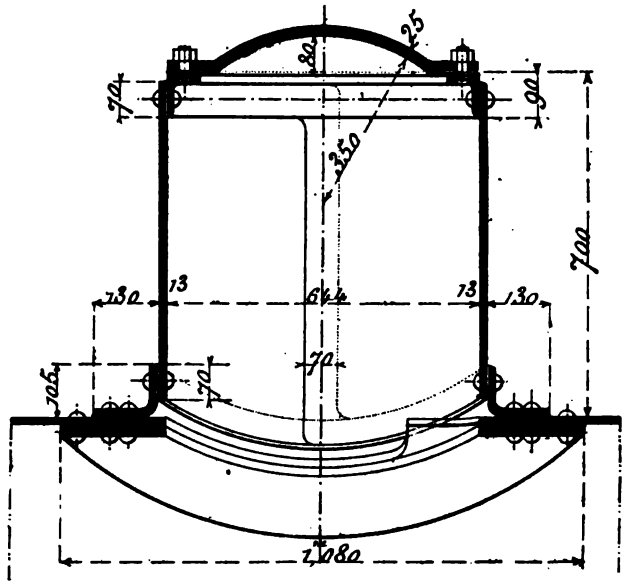


Fig. 384. — Type de dôme de prise de vapeur (*Est*, Mach. 3001-3015).

par deux cornières cintrées, tournées, boulonnées entre elles, ajustées à emboîtage et rivées l'une à la partie cylindrique qui constitue le bas, l'autre à une calotte hémisphérique constituant la portion supérieure. Ce système est très usité en Angleterre et en Belgique (fig. 308, 383); il a été adopté par la Société alsacienne pour les nouvelles compound express des *Compagnies du Midi* et du *Nord* (fig. 323, 387).

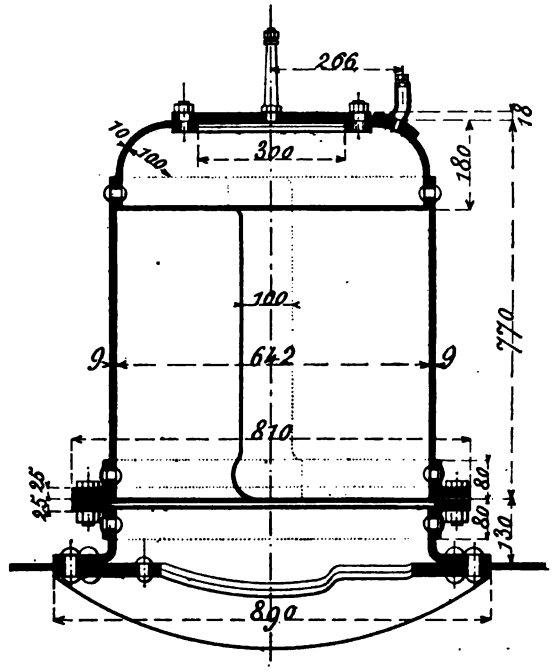
La *Compagnie de l'Ouest* et quelques autres placent parfois le joint démontable du dôme à la partie basse (fig. 385).

La *Compagnie d'Orléans*, dans ses nouvelles machines, emploie deux dômes placés l'un au-dessus du foyer, l'autre à l'avant du corps cylindrique, reliés par un tuyau horizontal assemblé sur chacun d'eux au-dessus de la clouure de la calotte au moyen d'une collerette (fig. 388). Le dôme avant renferme le régulateur et porte les soupapes de sûreté.



Nord (Mach. 2121-2157).

204. Tubes. — Nous avons vu plus haut que les tubes, qui se faisaient autrefois presque exclusivement en laiton, se confectionnent aujourd'hui, en France et dans quelques pays, principalement en acier ; aux États-Unis on donne la préférence au fer au bois et en Angleterre on emploie beaucoup, concurremment avec le laiton et l'acier, un métal de composition spéciale (red metal) qui n'est en somme que du cuivre durci. Nous avons aussi traité ailleurs la question des proportions à donner aux tubes.



Ouest (Mach. 3 531-3 587).

Fig. 385. — Types de dômes de prise de vapeur.

Il ne nous reste qu'à envisager leur mode de pose et de fixation.

On sait que les tubes des chaudières locomotives peuvent être disposés par rangées verticales ou horizontales (fig. 390, 391). La première, qui est aujourd'hui de beaucoup la plus usitée, se prête mieux au dégagement des bulles de vapeur et à la circulation de l'eau ; mais elle a, surtout pour les foyers consolidés par des fermes en long non supportées, l'inconvénient de déterminer des lignes de ruptures ou tout au moins un affaiblissement de la plaque suivant les rangées verticales de tubes. En outre, elle ne permet pas de loger autant de tubes que la disposition par rangées horizontales.

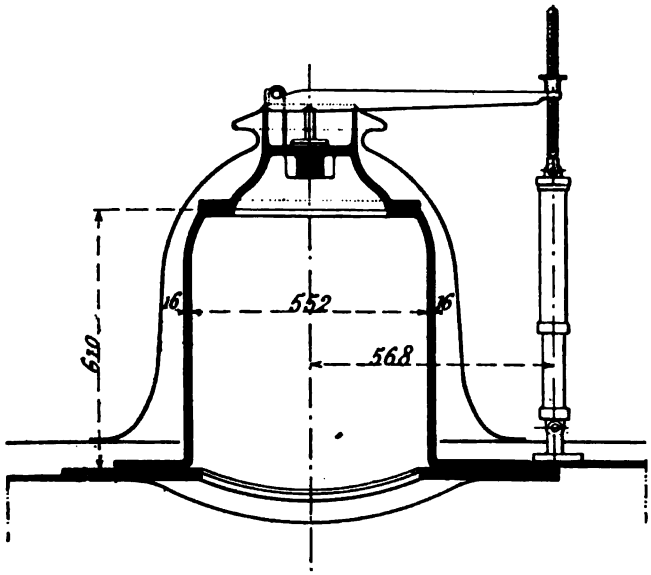


Fig. 386. — Dôme du *Midland Railway*, avec joints soudés.

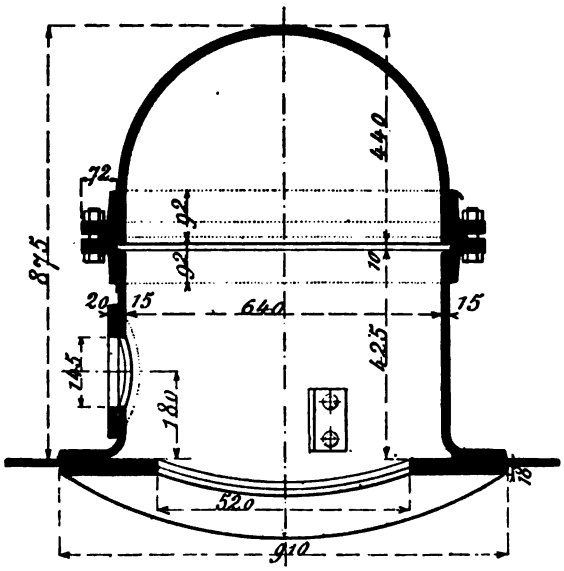


Fig. 387. — Dôme des locomotives à grande vitesse (2 158-2 160) du *Chemin de fer du Nord*.

La plupart des Compagnies emploient des tubes droits, mais plusieurs administrations, en Angleterre notamment, ont l'habitude de cintrer légèrement les tubes suivant leur longueur, dans le plan vertical, de manière à permettre leur dilatation sans qu'ils viennent forcer sur les plaques, pratique introduite, croyons-nous, par M. Stroudley. La flèche de courbure ainsi donnée aux tubes peut avoir de 40 à 50 mm. Ce système présente des avantages quand le travail de la pose des tubes est bien surveillé ; s'il en est autrement, il peut arriver que des ouvriers négligents opèrent le montage sans tenir compte

de la courbure, les tubes voisins viennent à se toucher par leurs parties cintrées, ce qui peut occasionner une rapide détérioration du métal dans les parties en contact.

Les tubes lisses sont encore les plus employés, mais on monte actuellement, en France surtout, un grand nombre de chaudières avec des tubes Serve, à ailettes.

Les tubes en laiton et en acier sont généralement raboutés, du côté du foyer, par une manchette en cuivre rouge brasée (fig. 392 et 396).

Le raboutage était particulièrement nécessaire avec les tubes en laiton, ce métal devenant extrêmement cassant quand il est soumis à une température de plus de 250° C. environ, à laquelle il est fort exposé à son assemblage sur la plaque où la transmission de calorique ne s'effectue pas aussi bien que dans les autres points et où l'on peut toujours craindre un coup de feu. Avec les tubes en acier, le raboutage paraît peu utile, le métal que fournissent actuellement les usines étant des plus ductiles et se prêtant parfaitement au dudgeonnage et au collage des bouts de tubes sur les plaques ; aussi quelques adminis-

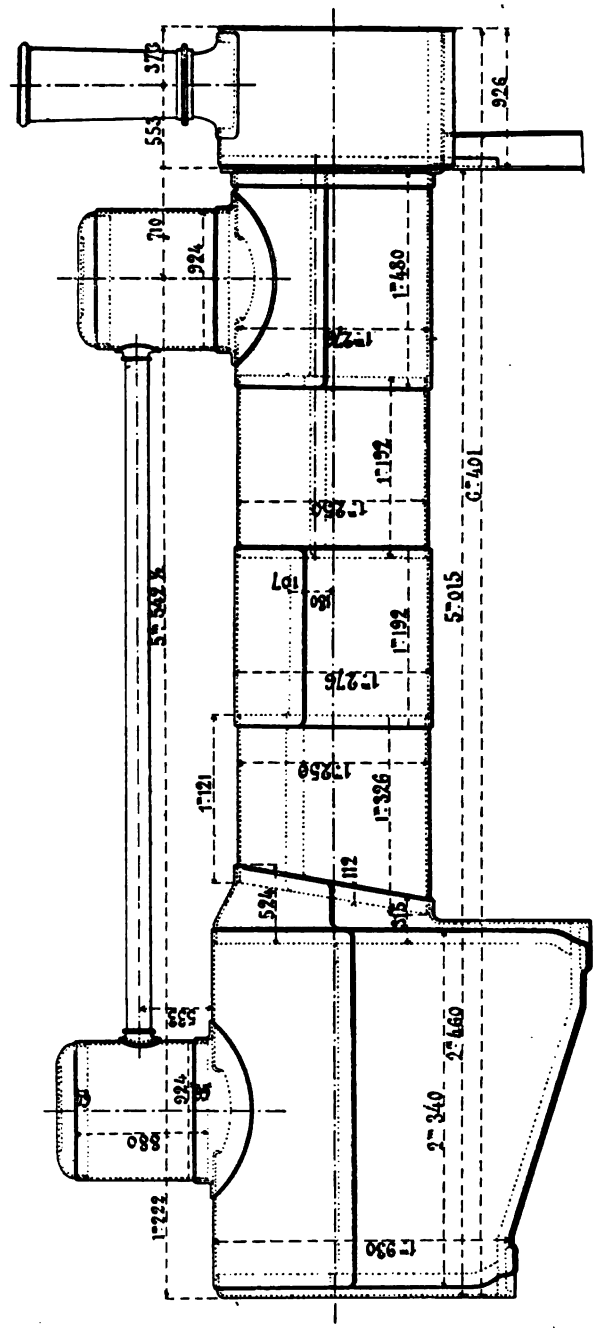


Fig. 388. — Élévation extérieure de la chaudière de la locomotive à grande vitesse n° 103 du *Chemin de fer d'Orléans*.

trations, au nombre desquelles il convient de citer la *Compagnie de l'Ouest*, commencent à se dispenser de cette opération assez coûteuse et d'utilité contestable.

En ce qui concerne le raboutage, nous prendrons comme exemple la pratique de la *Compagnie de Lyon*. On rétreint, au diamètre de 63 mm., l'extrémité du tube en cuivre qui doit pénétrer dans la plaque du foyer et on rabat, à l'autre extrémité, une collerette de 7,5 mm. ; on rétreint à chaud sur une longueur de 45 mm., l'extrémité à rabouter du tube en acier et on la fait entrer dans le bout du tube en cuivre muni de la collerette après avoir fraisé et nettoyé les surfaces en contact. On maintient l'assemblage au moyen d'une broche passée à l'intérieur des tubes et on met le tout ensemble dans une position verticale, le cuivre en bas, devant un four à chalumeau ; on place de la soudure dans le godet formé par la collerette et on chauffe jusqu'à ce que cette soudure soit bien fondue et ait bien pénétré entre les surfaces ; on enlève ensuite la collerette et l'excès de soudure à la fraise et à la meule de manière à ramener à 65 mm. le diamètre extérieur du tube. Après raboutage, les tubes sont essayés à une pression intérieure de 25 kg. par cm.²; ceux qui présentent des traces de déformation, de crique ou de suintement ne peuvent être employés.

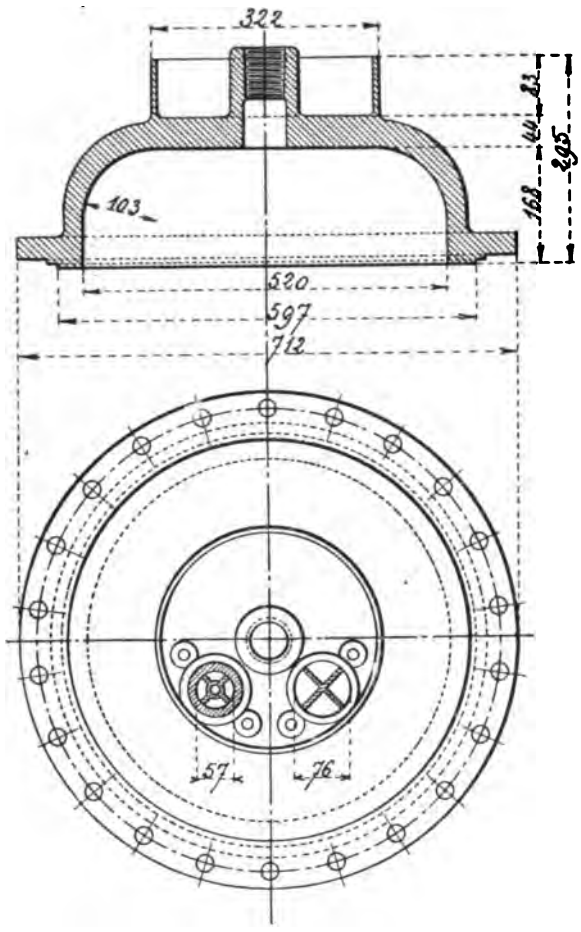


Fig.389. — Couvercle de dôme en fonte ; disposition américaine.

Les deux extrémités des tubes sont recuites et soigneusement nettoyées ensuite avant leur mise en place.

Dans quelques autres ateliers, au lieu de rétreindre les tubes, on les amincit au tour, les manchettes étant de même alésées et amincies sur les bords; le raboutage ainsi pratiqué est une opération plus longue et plus coûteuse.

L'assemblage des tubes sur la plaque tubulaire arrière doit être opéré avec un soin particulier, car il est difficile de lui assurer une étanchéité qui reste toujours parfaite étant donnée l'allure forcée des foyers de locomotives.

Les bouts des tubes ne sont pas en contact direct avec l'eau et leur joint sur les plaques forme une discontinuité des surfaces, peu favorable à la transmission du calorique ; ils sont ainsi exposés à se surchauffer et par conséquent à se dilater fortement en élargissant le trou de la plaque dans lequel ils se trouvent. Lorsque l'allure du feu vient à diminuer ou qu'un courant d'air froid, par suite de l'ouverture de la porte du foyer, vient à les frapper, ils se contractent, mais les trous de la plaque, dont le métal a dépassé la limite d'élasticité, ne reviennent pas exactement à leur diamètre primitif ; il se produit entre le tube et le bord du trou, un léger interstice donnant lieu à une fuite. On attribue aussi le surchauffage causant ces fuites à des chambres de vapeur qui se forment sur les plaques tubulaires.

Ces fuites sont surtout à redouter dans les foyers de peu de profondeur parce que, la grille se trouvant très rapprochée de la plaque, les bouts de

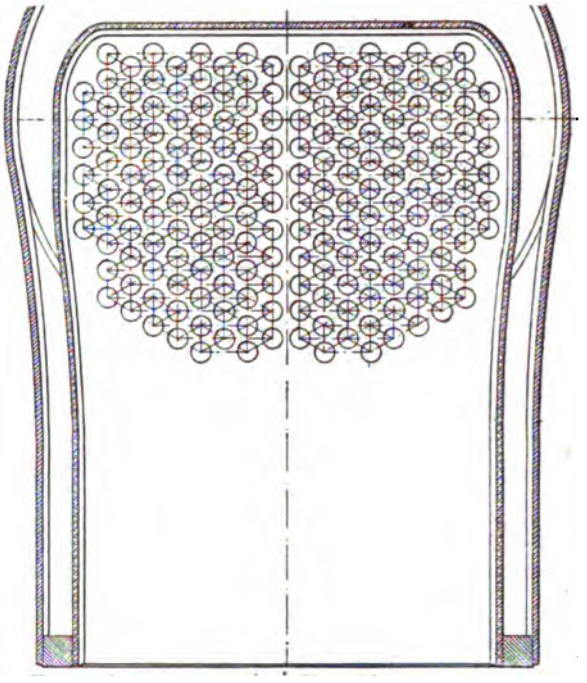


Fig. 390. — Montage des tubes par rangées verticales.

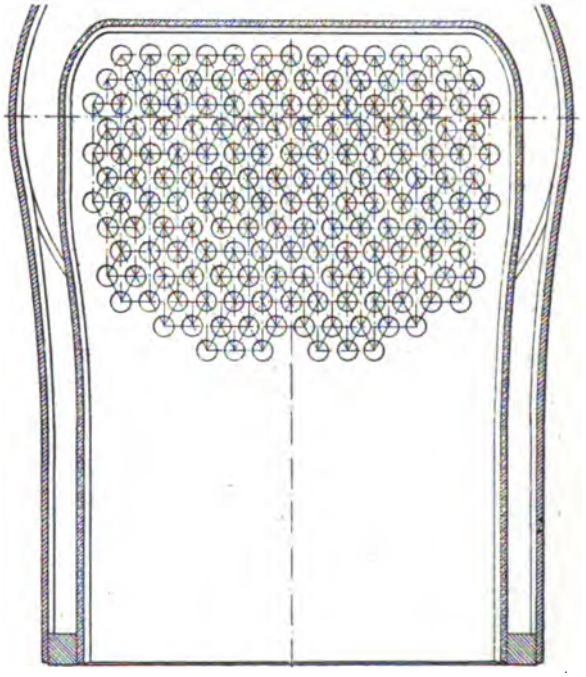


Fig. 391. — Montage des tubes par rangées horizontales.

tubes, soumis à un rayonnement intense et léchés par des gaz plus chauds, s'échauffent davantage. La présence, dans le foyer, d'une voûte en briques et surtout d'un bouilleur en est le meilleur palliatif, ces appareils protégeant à la fois la plaque tubulaire, et contre le rayonnement direct du combustible ou le contact des flammes les plus chaudes, et contre l'action directe de l'air froid qui peut rentrer par la porte. Les viroles ont une action analogue mais moins efficace et elles ont d'autre part l'inconvénient de réduire la section de passage des gaz.

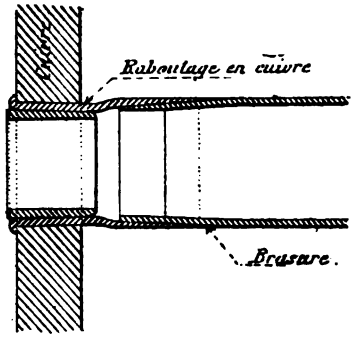


Fig. 392. — Raboutage des tubes.

L'assemblage sur la plaque tubulaire avant n'est pas soumis à des conditions aussi rudes à beaucoup près et l'on se dispense toujours de le compléter par des viroles.

Les tubes sont emmanchés par l'avant dans les trous percés, pour les recevoir, à travers les plaques tubulaires, fixés par un sertissage énergique opéré à l'aide de l'appareil dudgeon et souvent rivés en outre aux deux extrémités. La plupart des Compagnies prescrivent que l'assemblage sera complété par l'enfoncement, dans l'extrémité du tube regardant le foyer, d'une virole en acier tournée, légèrement conique, souvent elle-même serrée au dudgeon (fig. 394, 396, 397). Avec les tubes en acier, on se dispense souvent du virolage (fig. 395, 398, 399).

Les tubes sont ordinairement élargis du côté de la boîte à fumée pour faciliter leur mise en place et surtout leur extraction, quand ils sont recouverts de tartre.

Les figures 394 à 399 représentent divers modes de pose et de fixation. Nous résumons ci-dessous la pratique de quelques-unes des principales administrations.

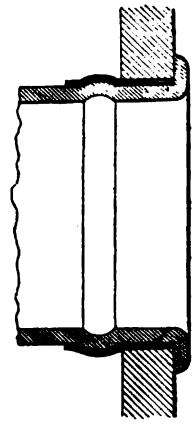


Fig. 393. — Montage d'un tube avec interposition d'une manchette en cuivre rouge.

Compagnie du Nord. — Depuis 1892 on n'applique plus que des tubes en acier doux, lisses ou à nervures, ayant respectivement 45, 50 et 70 mm. de diamètre. Les premiers sont espacés de 60 mm., les seconds de 64,7, les derniers de 86,7 mm. d'axe en axe. On ne raboute pas les tubes neufs. La plaque tubulaire est percée de trous cylindriques ayant un diamètre plus faible de 2 mm. que celui des tubes à l'extérieur. La plaque tubulaire de boîte à fumée, en fer, est percée de trous cylindriques d'un diamètre un peu plus grand, les tubes étant élargis. On fait, à chaud, le rétreignage des tubes, du côté du foyer, au moyen d'une

matrice légèrement conique enfoncée à coups de marteau. On laisse les tubes déborder des deux côtés de 3 mm. et on mandrine au dudgeon ; il reste à chaque bout, sur les plaques, une saillie de 1/4 de mm. seulement. On estime que le serrage est assez énergique pour dispenser du rivetage.

On emploie encore de vieux tubes en laiton auxquels on ajoute du côté du foyer, une manchette de cuivre rouge de 3 mm. d'épaisseur et de 0,10 m. à 0,20 de longueur suivant les cas.

Compagnie de l'Est. — Depuis l'année 1888, tous les tubes neufs sont en acier doux. Le diamètre des tubes lisses varie de 40 à 50 mm., mais le diamètre le plus usuel est de 48,75 mm. ; les tubes Serve ont 70 mm. de diamètre. L'écartement d'axe en axe des tubes lisses varie de 55,5 mm. à 73,5 mm. ; il est de 90 mm. pour les tubes Serve. Tous les tubes sont mandrinés dans les plaques tubulaires et rivés aux deux bouts. On ne met plus de viroles aux tubes en acier, mais les anciens tubes en laiton en reçoivent du côté du foyer et dans les trois rangées inférieures de la boîte à fumée.

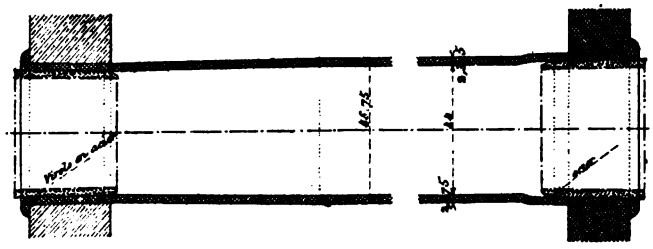


Fig. 394. — Montage des tubes de chaudières des *Chemins de fer de l'Est.*

Compagnie de Lyon. — Un certain nombre de machines sont encore munies de tubes en laiton, mais les types récents ont des tubes en fer ou en acier raboutés en cuivre rouge du côté du foyer, de 43, 48 et 50 mm. de diamètre et des tubes Serve de 65 mm. Les tubes sont mandrinés dans les plaques tubulaires, puis rivés et bagués.

Compagnie d'Orléans. — La plupart des machines sont munies de tubes en laiton, mais on en emploie aussi beaucoup en fer au bois ou en acier. Depuis 1887, tous les tubes sont raboutés du côté du foyer à l'aide d'une manchette en cuivre rouge étiré. Le diamètre des tubes est de 43, 48 et 50 mm. et leur espacement d'axe en axe respectivement de 58, 63 et 65 mm.

Après raboutage, les tubes sont en place de manière qu'ils présentent, sur chacune des plaques tubulaires, une saillie de 6 mm. environ. On mandrine ensuite avec un appareil spécial et on procède au rabattage des bords des tubes à l'aide d'un marteau à main de 400 à 500 grammes dont la panne est en forme de champignon. Un outil à gorge formant bouterolle sert à finir le travail de rivure. On ne fait pas usage de viroles.

Chemins de fer de l'État. — Les tubes sont en laiton et ont un diamètre de 50 mm. ; leur espacement d'axe en axe varie de 65 à 68 mm. Ils sont fixés aux plaques par dudgeonnage, puis rivés et bagués du côté du foyer ; les bagues sont en acier et ont 45 mm. de longueur.

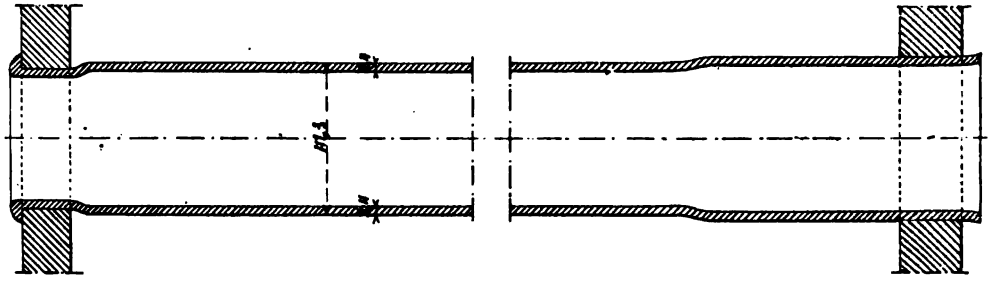


Fig. 395. — Tubes du *Great Eastern Ry* (d'après M. E. Sauvage).

Compagnie du Midi. — Les tubes, autrefois en laiton, sont maintenant en acier doux ; on les raboute en cuivre du côté du foyer. Ils ont les diamètres

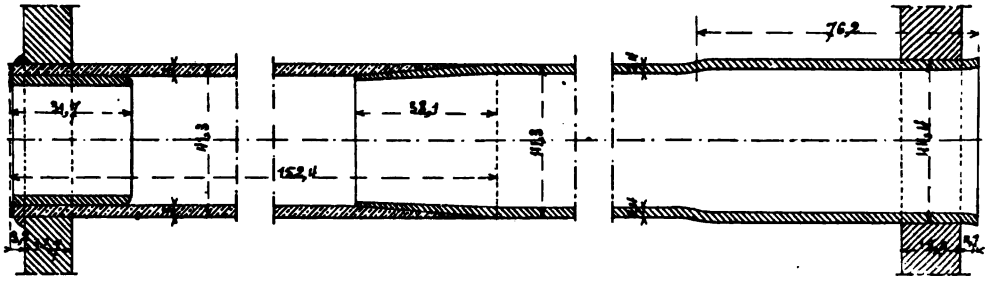


Fig. 396. — Tubes du *Great Eastern Ry*, raboutés en cuivre rouge.

de 45 et de 53 mm. et sont espacés respectivement de 60 et 69 mm. d'axe en axe. Les chaudières de quelques machines récentes sont munies de tubes à ailettes de 65 à 70 mm. espacés de 84 à 85 mm.

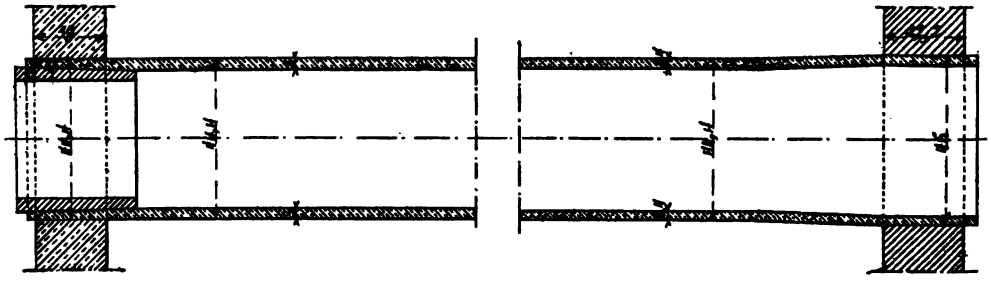


Fig. 397. — Tubes de chaudières du *Great Northern Ry* (d'après M. E. Sauvage).

Les tubes lisses sont mandrinés et munis d'une virole en acier du côté du foyer. Les tubes en acier sont en outre raboutés, à l'exception des tubes Serve.

Etat belge. — Les tubes sont en fer homogène quand les eaux sont de bonne qualité, en laiton à 30 p. 100 de zinc quand les eaux sont incrustantes.

Leur diamètre est de 45 et 50 mm. et leur espacement d'axe en axe de 60 mm.

Pour les tubes en fer de 45 mm., on perce les trous de la plaque tubulaire avant à 46 mm. de diamètre et ceux de la plaque tubulaire arrière à 44 mm. avec une conicité de 1 mm. Les tubes se trouvent amincis de 1 mm. du côté

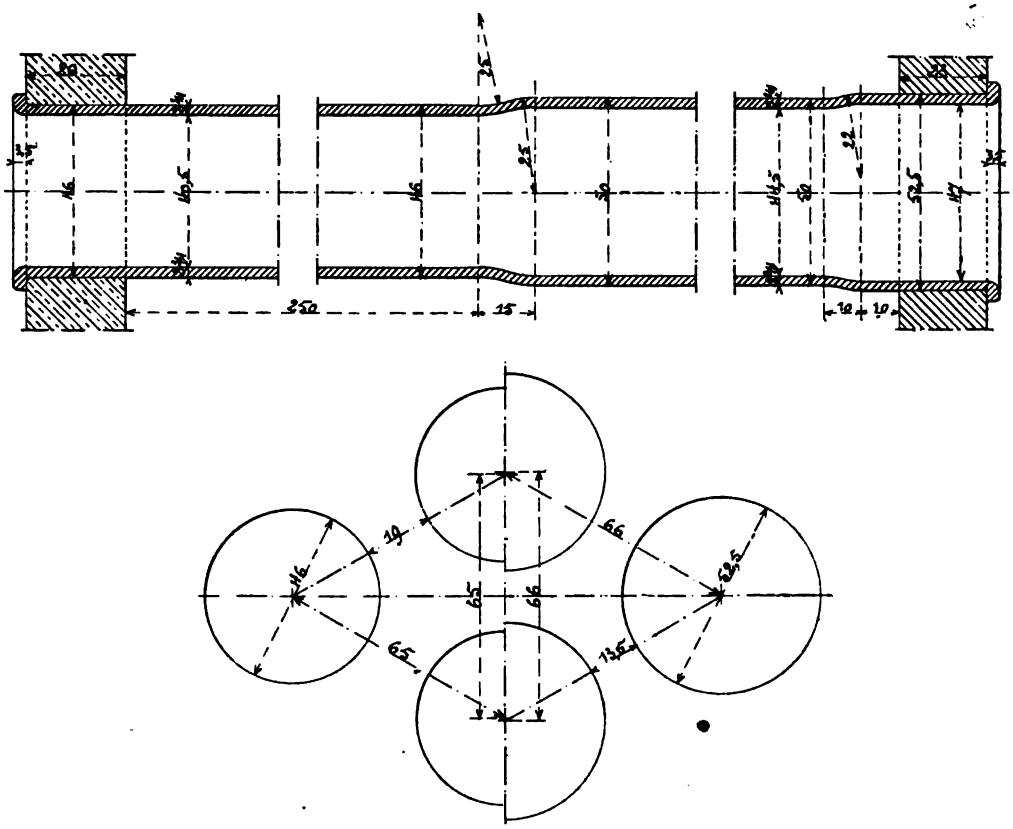


Fig. 398. — Tubes des chaudières du *Grand Central belge* (d'après M. E. Sauvage).

du foyer et élargis, au contraire, de 1 mm. à l'autre bout. On assure la fixation par un sertissage au dudgeon ; les extrémités sont rabattues et rivées sur la plaque à l'aide d'un outil spécial. On n'emploie pas de viroles.

Les tubes en laiton se posent comme les précédents, mais l'extrémité placée du côté de la boîte à fumée est seule rivée et profilée en bourrelet. L'autre bout est simplement mandriné, mais il reçoit une virole en acier.

Grand Central belge. — Les tubes sont en fer étiré ; ils ont un diamètre de 50 mm. et sont espacés de 65 mm. On les élargit du côté avant sur une longueur de 45 mm. au diamètre de 52 1/2 mm. et on les rétreint à 46 mm.

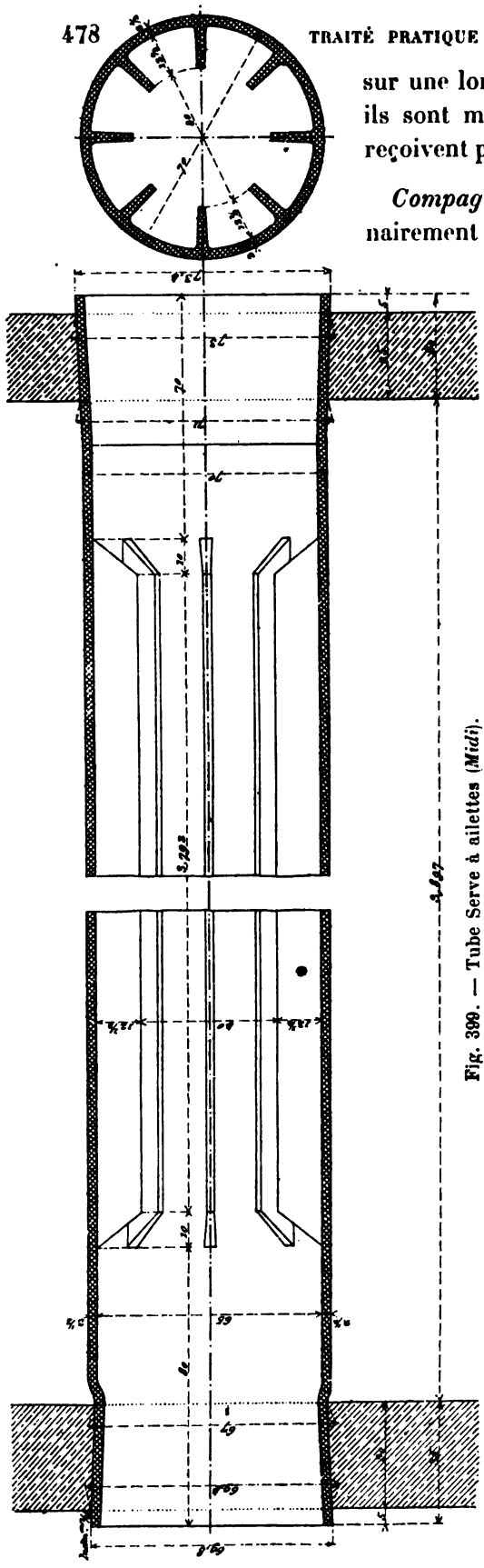


Fig. 399. — Tube Serve à ailettes (*Midi*).

sur une longueur de 290 mm. du côté du foyer; ils sont mandrinés aux deux extrémités et ne reçoivent pas de viroles.

Compagnies anglaises. — Les tubes sont ordinairement en laiton et ont un diamètre maximum de 47,6 mm. (*L. N. W.*) et minimum de 41,3 mm. (*Midland*); les diamètres le plus employés sont ceux de 41,4 et 44,45 mm. Leur espacement d'axe en axe varie de 59 à 70 mm. Quelques Compagnies (*L. and N. W.*, *Midland*) emploient des tubes en cuivre rouge durci (*red metal*) pour tout ou partie de leur matériel. Le *Brighton*, le *L. and S. W.* et le *North London* emploient des tubes en acier; le *Great Eastern* a adopté des tubes en acier avec raboutage en laiton du côté du foyer.

Partout, les tubes sont mandrinés au dudgeon, souvent avec des appareils dont les galets ont aux deux extrémités des parties coniques formant dans le tube des bourrelets de chaque côté des plaques tubulaires. La plupart des Compagnies placent des viroles en acier du côté du foyer et ne rivent pas les tubes. Quelques-unes (*L. and S. W.*) rétreignent les tubes de 2 à 3 mm. du côté du foyer et l'élargissent d'autant du côté de la boîte à fumée.

Etats-Unis. — D'une manière générale les tubes sont en fer et ont un diamètre extérieur de 51 mm. Le *New York Central* emploie à peu près seul des tubes en acier, du moins d'une manière exclusive. La fixation des tubes est opérée au dudgeon et on ne place jamais de

viroles intérieures. Comme les foyers sont en acier et que les plaques tubulaires ont une faible épaisseur, on emploie, pour assurer l'étanchéité, un procédé très simple et des plus efficaces. (fig. 393). On place, avant le tube, à l'intérieur du trou percé pour le recevoir, une bague en cuivre rouge recuite assez mince (1,5 à 3 mm.) qui s'emmanche à frottement dur autour du tube et empêche le contact direct de ce dernier avec la plaque. On opère ensuite le dudgeonnage qui refoule le cuivre, plus malléable que le métal du tube ou de

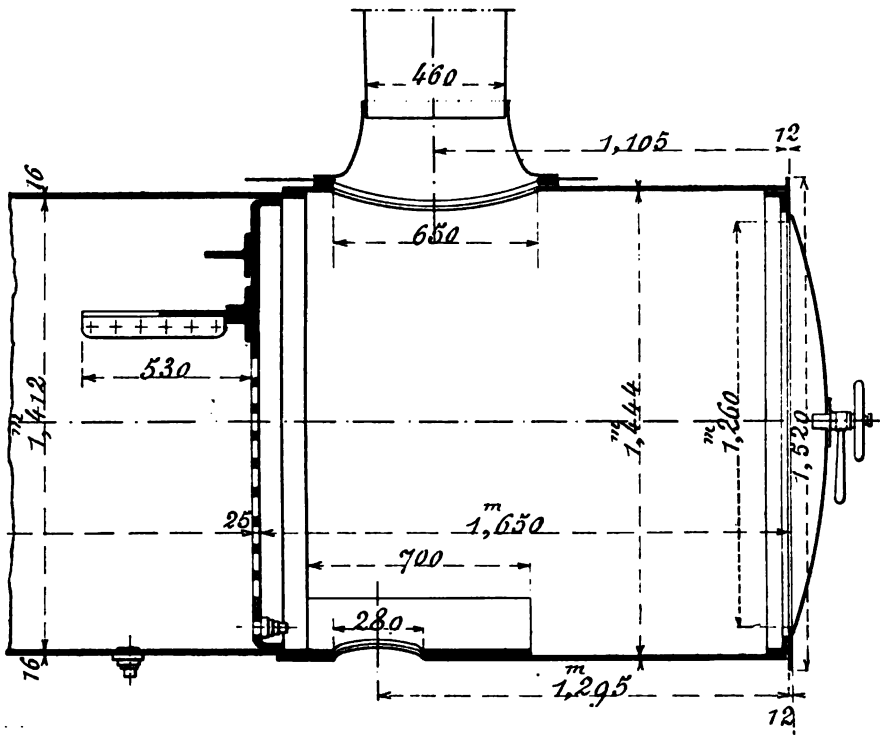


Fig. 400. — Boîte à fumée des locomotives à grande vitesse (série 1 751-1 762) des *Chemins de fer du Midi.*

la plaque, et forme joint. On achève l'assemblage par un rivetage relevant sur toute la circonférence un bourrelet formé par le métal de la bague et du tube.

205. Plaque tubulaire avant. — La plaque tubulaire avant peut être, soit disposée à l'intérieur du corps cylindrique qui se prolonge vers l'avant pour former la boîte à fumée (fig. 316, 321, 322, 324), soit placée au dehors, en saillie, la tonne venant buter contre elle (fig. 314, 315, 317).

Dans le premier cas, la plaque tubulaire est circulaire et porte à son pourtour une pince relevée, tournée vers l'avant, qui vient se river à simple rang sur la virole extrême, figure 400. On la tourne à son pourtour pour rendre l'assemblage plus parfait, l'emboutissage ne permettant guère d'obtenir une grande précision d'ajustage, surtout s'il se fait à la main. Quelque-

fois, pour éviter cet emboutissage, on attache la plaque au corps cylindrique par une cornière cintrée placée à l'intérieur, dont les abouts sont soudés; cette disposition a été adoptée par la Société alsacienne pour les locomotives express du *Nord* (fig. 321) (Mach. 2135-2157).

On a autrefois employé à la *Compagnie de l'Ouest* une disposition différente. La plaque tubulaire, en cuivre rouge, était circulaire et plane, de plus grand diamètre que le corps cylindrique, qu'elle dépassait d'une quan-

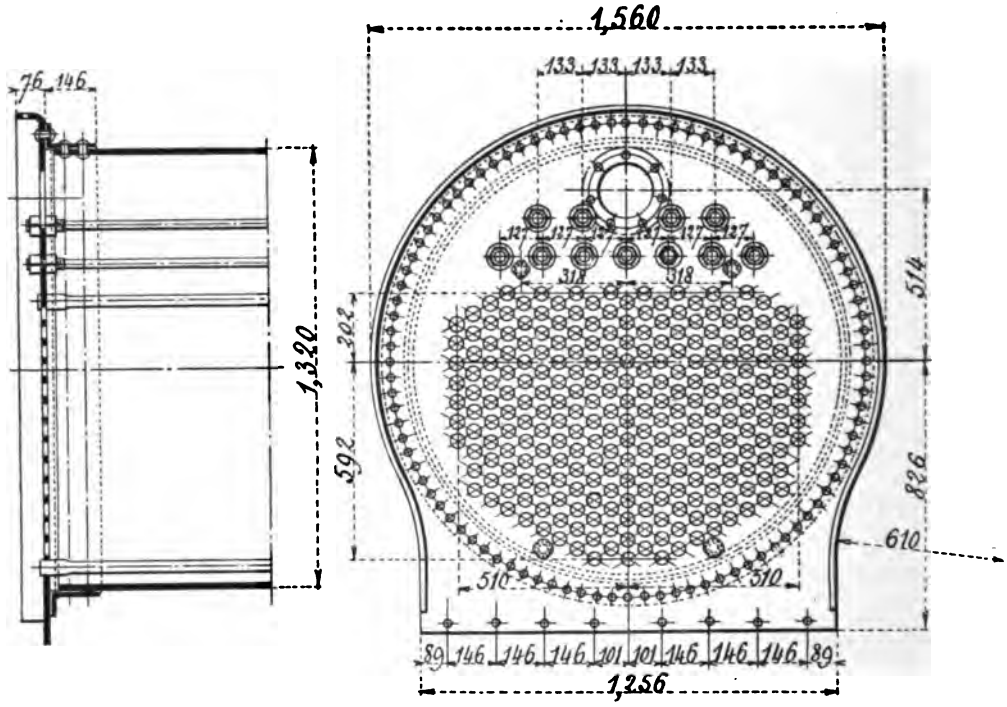


Fig. 401. — Plaque tubulaire pour boîte à fumée en saillie sur le corps cylindrique (*Great Eastern Railway*).

tité suffisante pour lui être fixée par une cornière extérieure; la boîte à fumée, du même diamètre que le corps cylindrique, était rattachée pareillement à la plaque tubulaire.

Quand la boîte à fumée est en saillie (fig. 403, 404), disposition usuelle à la *Compagnie d'Orléans* et en Angleterre, la plaque tubulaire présente, à sa partie inférieure, une forme sensiblement rectangulaire et, à sa partie supérieure, une forme circulaire de rayon un peu supérieur à celui du corps cylindrique (fig. 401). La plaque sert alors d'attache principale à la chaudière sur le châssis, comme nous le verrons plus loin. Elle est reliée au corps cylindrique par une cornière cintrée et tournée dont les abouts sont soudés, qui lui est fixée par une simple rangée de rivets, mais très rapprochés, ou double, et à la virole avant par une double rangée de rivets (fig. 330) (1).

La plaque porte une pince emboutie vers l'avant, sauf à la partie inférieure qui reçoit la tôle d'enveloppe de la boîte à fumée.

Les plaques tubulaires avant se font ordinairement en fer ou en acier; mais quelques Compagnies, celle de l'*Ouest* entre autres, pour les rendre moins sensibles à l'action corrosive des suies humides que contient la boîte à fumée

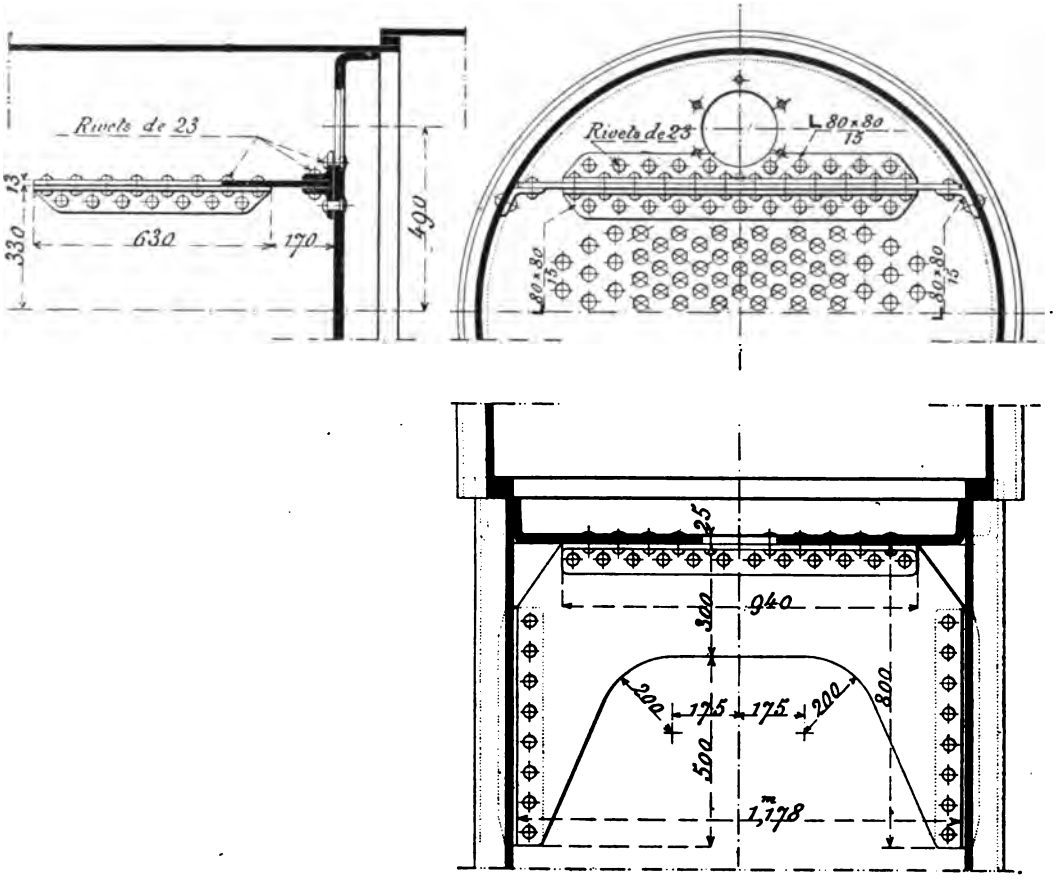


Fig. 402. — Consolidation de la partie supérieure de la plaque tubulaire avant (*État prussien*).

ou, au contraire, à l'effet du feu quand il prend dans cette dernière (occurrence fréquente dans les anciennes machines à boîtes à fumée trop petites et mal closes), les ont à une certaine époque confectionnées en cuivre, mais cette pratique est abandonnée.

La partie haute de la plaque tubulaire est armaturée comme la face arrière de la chaudière (fig. 402).

206. Plaque tubulaire intermédiaire. — Quand la longueur des tubes atteint ou dépasse 5,00 m., on juge ordinairement nécessaire de les supporter vers leur milieu par une plaque tubulaire intermédiaire, en cuivre

rouge, à travers les trous de laquelle ils passent à frottement doux et qui les empêche de fouetter et de se toucher (*Paris-Orléans, P.-L.-M.*).

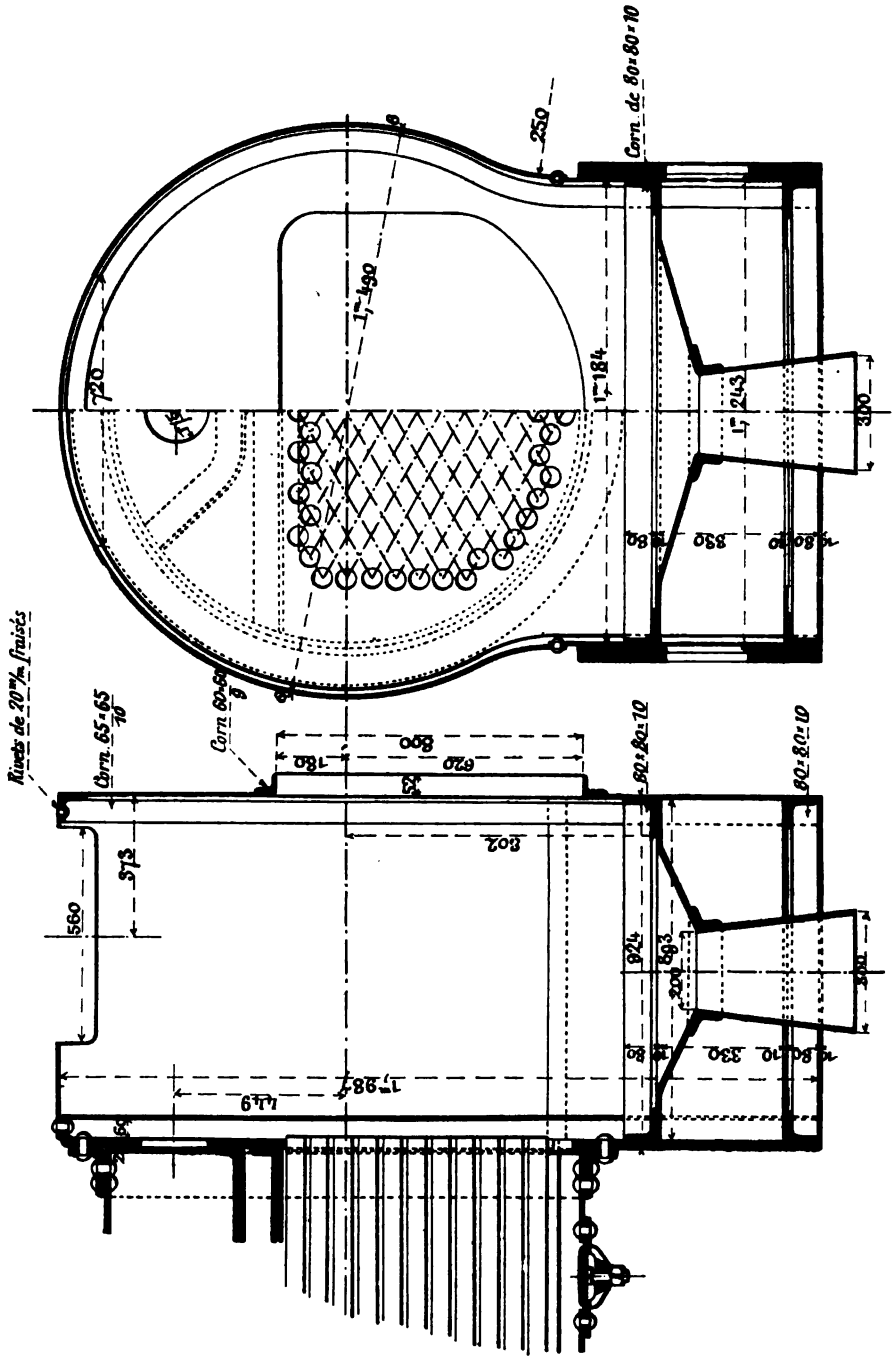


Fig. 103. — Boîte à fumée des locomotives à grande vitesse (série 77-86) du *Chemin de fer d'Orléans*.

C'est une pratique qui disparaîtra avec les tubes très longs.

207. Boîte à fumée. — La boîte à fumée n'est soumise à aucune pression intérieure et peut avoir des échantillons beaucoup plus réduits que la chau-

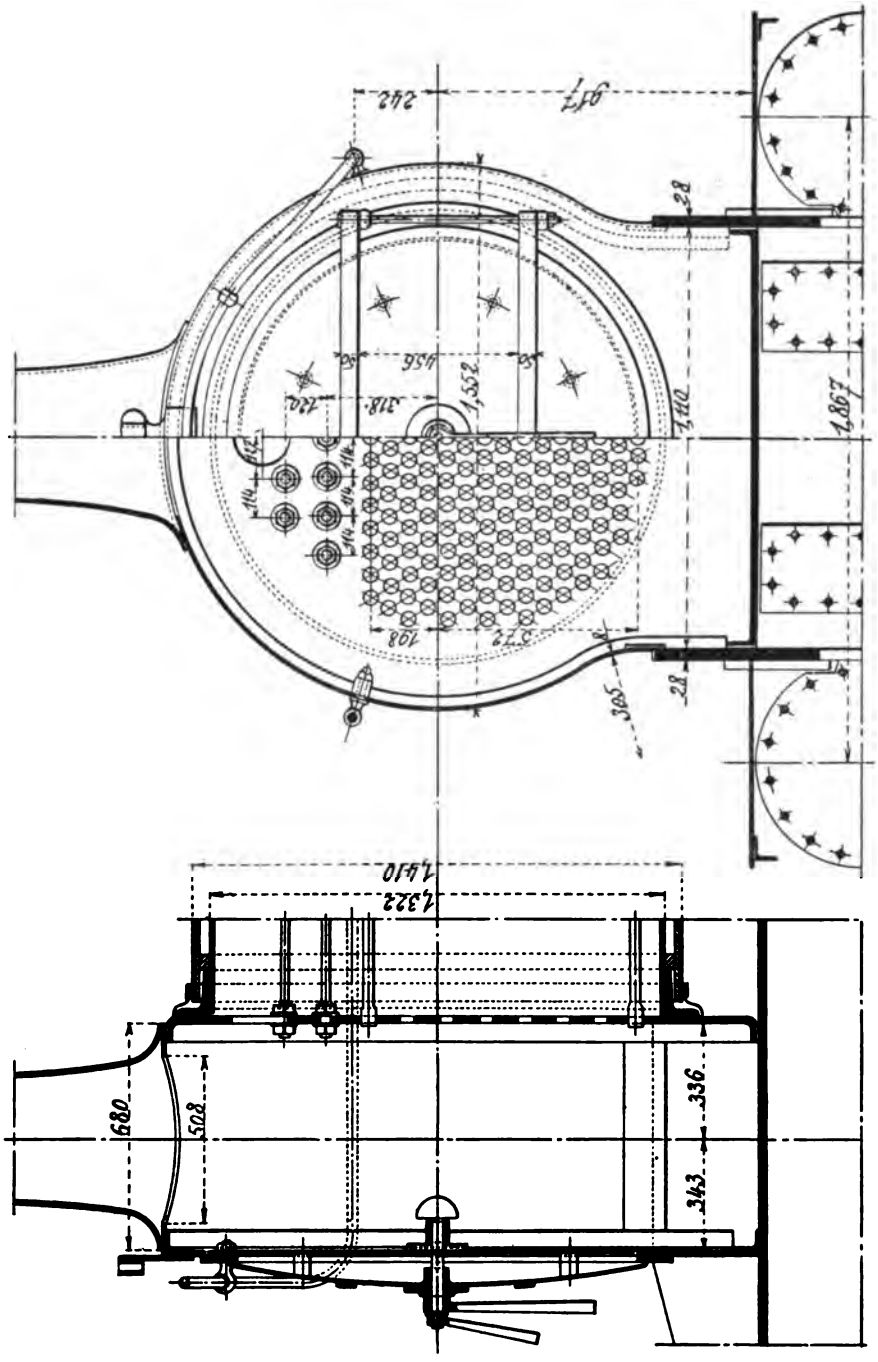


Fig. 404. — Boîte à fumée faisant saillie sur le corps cylindrique ; disposition anglaise (*London and South Western Railway*).

dière elle-même ; toutefois, elle doit présenter une assez grande solidité, car c'est par elle que se fait l'attache sur le châssis.

Les boîtes à fumée, en ce qui concerne leur genre de construction, appartiennent à deux types bien distincts. Dans l'un, la boîte à fumée fait saillie sur le corps cylindrique (fig. 309), dans l'autre elle est formée par le prolongement de celui-ci (fig. 324). Aujourd'hui la boîte à fumée en saillie est employée en France par la *Compagnie d'Orléans* seulement (fig. 403) et en Angleterre par toutes les Compagnies de chemins de fer. Elle présente pourtant, comme nous le verrons, certains avantages et on peut s'étonner de la voir si peu usitée en dehors de la Grande-Bretagne.

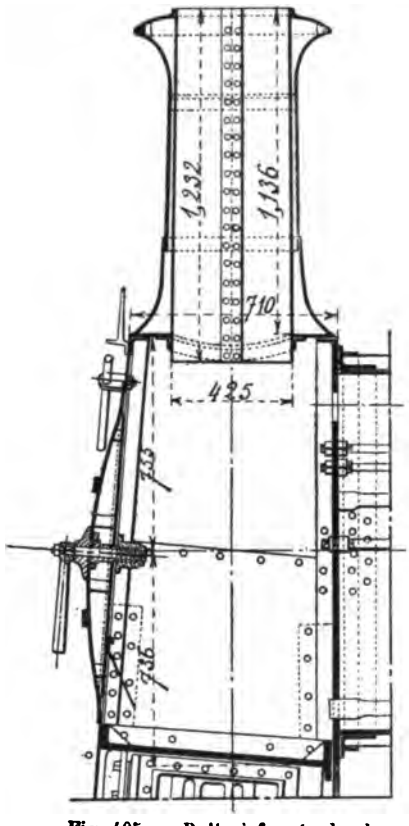


Fig. 405. — Boîte à fumée des locomotives à cylindres extérieurs du *North London Railway*.

La figure 404 représente la boîte à fumée des locomotives à cylindres extérieurs du *London and South Western* qui peut être prise comme exemple et comme type. La plaque tubulaire offre la forme dont nous avons parlé ci-dessus et se trouve reliée au corps cylindrique par une cornière cintrée et continue ; cette plaque tubulaire est emboutie vers l'avant sur tout son pourtour, la pince recevant, en haut et sur les côtés, la tôle d'enveloppe de la boîte à fumée et s'attachant, par sa partie basse, à une grosse tôle horizontale qui forme le fond de la boîte et se fixe aux longerons par un bord tombé ou une cornière. La face avant offre exactement le même profil que la plaque tubulaire, mais elle est beaucoup plus mince ; elle n'est pas emboutie, mais se fixe à l'enveloppe et au fond par une cornière cintrée portant, sur chaque aile, une seule rangée de petits rivets. Elle est percée en son milieu d'une large ouverture pour la porte qui, dans le cas présent, est circulaire. La cheminée est attachée au milieu, à la partie supérieure de l'enveloppe, au moyen d'une embase en tôle emboutie ou en fonte, ou même d'une simple cornière.

Quand les cylindres sont extérieurs, les Anglais emploient souvent une disposition analogue à celle du *Great Northern Ry* représentée dans un autre chapitre. La tôle extérieure de la boîte à fumée descend jusqu'aux cylindres qu'elle contourne de manière à constituer leur enveloppe. Une tôle intérieure, concentrique à la première dans la partie haute et moyenne, ferme la boîte à fumée dont le fond est constitué par une tôle rivée au châssis. Cette disposition donne à la machine une grande élégance extérieure

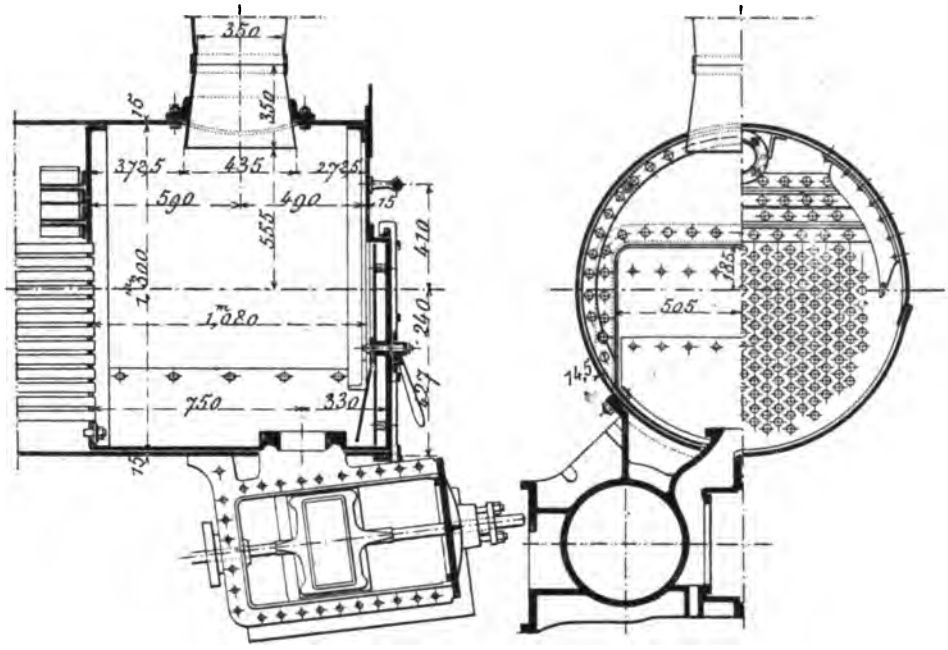


Fig. 406. — Boîte à fumée des locomotives de banlieue (729-742) des *Chemins de fer de l'Est.*

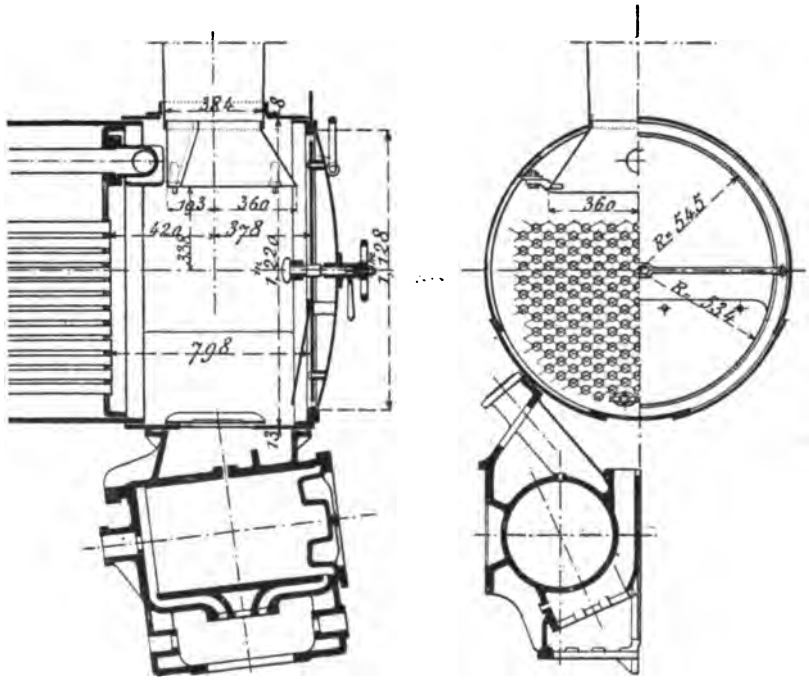


Fig. 407. — Boîte à fumée des locomotives de banlieue (type 3500) des *Chemins de fer de l'Ouest.*

et semble favorable à l'économie de combustible, les cylindres étant enve-

loppés d'une couche d'air portée, par le rayonnement de la boîte à fumée, à une température qui est à peu près celle de la vapeur à son entrée aux cylindres. Quand les cylindres sont inclinés, la façade avant de la boîte à fumée, placée dans le prolongement des brides de cylindres l'est elle-même comme on peut le voir (fig. 405).

La boîte à fumée, placée dans le prolongement du corps cylindrique, est aujourd'hui de beaucoup la plus usitée sur le continent européen et la seule

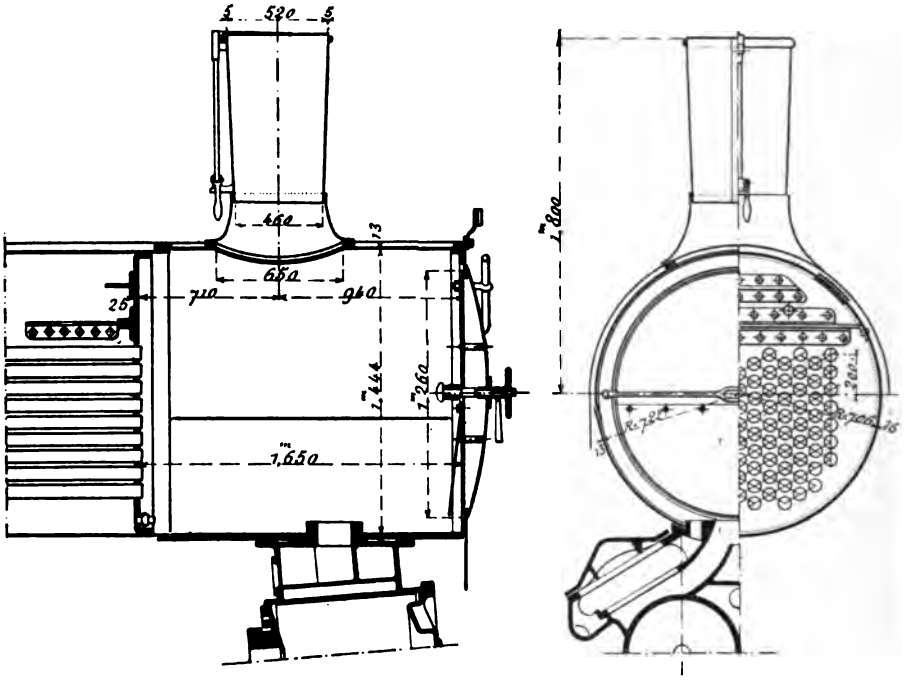


Fig. 408. — Type de boîte à fumée formée par le prolongement du corps cylindrique, avec extension sur l'avant (*Midi*).

qui le soit par les constructeurs des États-Unis. Elle est, en apparence tout au moins, plus simple que la précédente (fig. 318 à 325). La plaque tubulaire est circulaire et s'ajuste, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, à l'intérieur de la virole avant. Quelquefois, comme dans les chaudières de la Compagnie de l'*Est* représentées figures 297, 406, 409, cette virole se prolonge vers l'avant sur toute la longueur de la boîte à fumée dont elle-même forme l'enveloppe mais le plus souvent, pour réduire le poids, on arrête la virole à quelque distance en avant de la plaque tubulaire et on lui emboîte, à recouvrement, une virole beaucoup plus mince (6 à 8 mm.) qui forme l'enveloppe de la boîte à fumée; comme cette enveloppe supporte la chaudière sur le châssis, on la consolide à la partie basse soit en la doublant sur la moitié environ de sa circonférence inférieure (fig. 408, 409), soit en la constituant dans cette partie d'une tôle plus épaisse (fig. 407).

La face avant est formée par une tôle de même épaisseur que l'enveloppe à laquelle elle est réunie, soit par une cornière continue, cintrée, placée intérieurement ou à l'extérieur (fig. 407 et 409) ou par une pince relevée sur son bord (fig. 324). Cette façade est percée d'une ouverture de très grande section pour la porte de boîte à fumée. Quand cette porte est circulaire, l'ouverture ne laisse plus, sur la circonférence, qu'une étroite bande de métal; parfois même, la face avant se réduit à la cornière de pourtour.

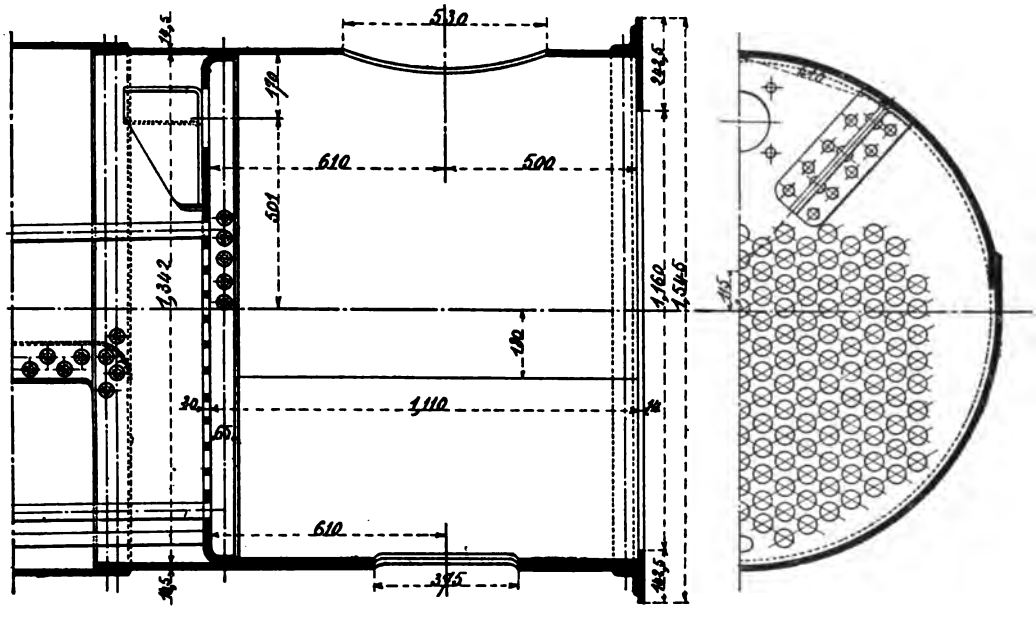


Fig. 409. — Type de boîte à fumée formée par le prolongement du corps cylindrique (*Est*, Mach. 3000).

On construit actuellement, comme nous le verrons ailleurs, beaucoup de boîtes à fumée prolongées vers l'avant, qui ont jusqu'à 2,00 m. de longueur intérieure; elles sont alors parfois constituées par deux viroles jointives réunies par un couvre-joint intérieur. La virole avant, qui est en porte à faux et n'est soumise à aucun effort direct, est plus mince que la virole arrière supportant la chaudière sur le châssis.

Les boîtes à fumée de ce type peuvent être d'un diamètre plus grand que le corps cylindrique; on interpose un anneau en fer forgé formant cale, entre les pinces jointives de la virole avant et de l'enveloppe de la boîte à fumée; cette disposition est fréquemment usitée aux États-Unis.

Quand la boîte à fumée est en saillie, elle ne porte pas d'enveloppe extérieure. Toutefois, quelques Compagnies anglaises, pour protéger la peinture du rayonnement intérieur, placent à l'intérieur de la boîte, sur tout son pourtour, un écran intérieur avec interposition d'un matelas d'air.

La boîte à fumée circulaire, prolongement du corps cylindrique, présente

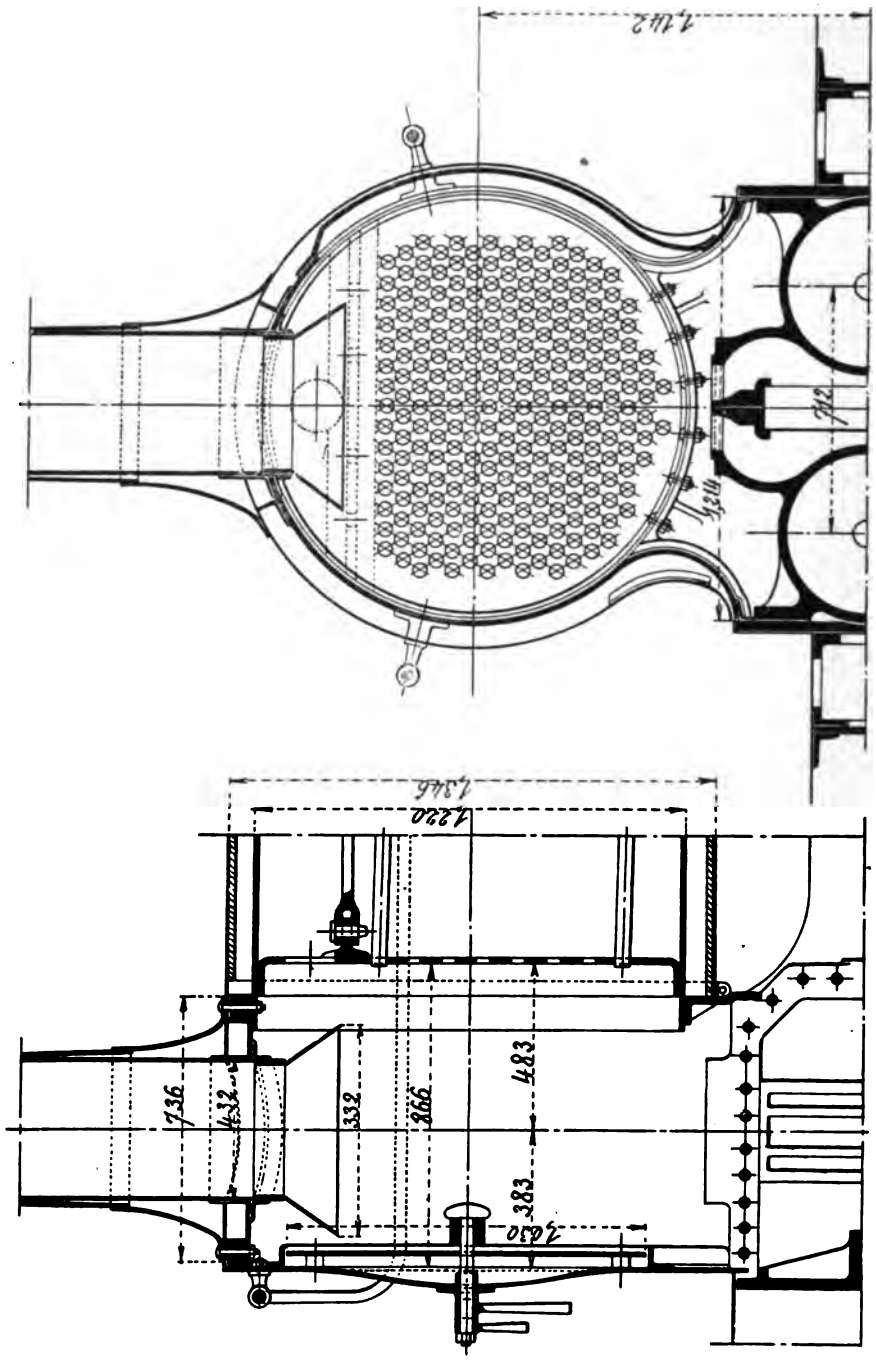


Fig. 410. — Boîte à fumée des types récents de locomotives du *Midland Railway*.

une certaine infériorité sur la boîte en saillie, inconvénients auxquels on peut d'ailleurs remédier en grande partie, nous le verrons. La génératrice infé-

rieure est trop rapprochée de la dernière rangée des tubes et les escarbilles, en s'accumulant sur le fond de la boîte, bouchent rapidement un certain nombre de tubes. Quand les tuyaux d'arrivée de vapeur aux cylindres sont placés à l'intérieur de la boîte à fumée, et c'est le cas de l'immense majorité des locomotives (on ne trouve guère d'exception à cette règle que sur les réseaux français du *Nord*, de l'*Est*, du *Midi* et de l'*Ouest*), ces tuyaux, même collés aussi près que possible de l'enveloppe, peuvent venir masquer les tubes des rangées extérieures.

On remédie à ces inconvénients en donnant à la boîte à fumée un diamètre plus grand ou en l'allongeant vers l'avant, ce qui augmente la surface du fond, et en disposant une trémie qui permet de vider facilement la boîte; en outre, les tuyaux de vapeur peuvent être reportés à l'avant, plus loin de la plaque tubulaire, de manière à ne pas gêner le tirage ou le nettoyage des tubes appartenant aux files extérieures. Ces dernières dispositions sont usitées dans la plupart des machines américaines et pour beaucoup de locomotives récentes, en Europe, particulièrement en France, en Belgique et en Allemagne.

M. S. Johnson est jusqu'ici le seul ingénieur anglais qui ait construit des boîtes à fumée dans le prolongement du corps cylindrique. Dans le dispositif adopté par lui pour les nouvelles locomotives du *Midland Ry* (fig. 410), la chaudière est supportée par une pièce en acier moulé au-dessus du massif des cylindres, intérieurs, au moyen d'un court prolongement; de la virole avant qui, dans la partie basse, ne comporte aucun prolongement le fond de la boîte, formé par le dessus des cylindres, est donc plus bas que la génératrice inférieure de la boîte à fumée et les escarbilles se logent dans les poches qui se trouvent de part et d'autre de la boîte à tiroir commune placée au centre.

La tôle, formant l'enveloppe de la boîte à fumée, sur le quart inférieur de la circonférence, se détache du corps cylindrique et vient s'ajuster sur les longerons à l'aide de deux petites cornières. Le fond de la boîte à fumée, vers l'arrière, est constitué par la pièce en acier moulé dont nous avons parlé.

208. Cheminées. — La cheminée de la locomotive, toujours fort courte en raison du peu de hauteur disponible entre le dessus de la boîte à fumée et la limite supérieure du gabarit, est, nous l'avons vu, un véritable éjecteur servant à produire le tirage par l'entraînement des gaz dû à l'action du jet d'échappement. Aussi, le tirage naturel est-il extrêmement réduit dans la locomotive et tout à fait incapable de créer une activité de la combustion suffisante pour permettre la production d'un travail même très faible. Aussi, quand la machine est arrêtée et qu'il est nécessaire d'activer le feu pour relever ou même, dans certains cas, seulement entretenir la pression à son

taux normal, est-il nécessaire d'envoyer, au moyen du souffleur, un jet de vapeur vive provenant de la chaudière à l'aide du tuyau du souffleur.

La hauteur disponible sous le gabarit est variable d'une contrée ou d'une Compagnie à l'autre. En France, la partie supérieure de la cheminée, les bandages étant supposés à l'état neuf, se trouve à une distance du plan supérieur des rails qui est de :

Ouest	4,25 m.	
Nord	4,15 —	(4,22 m. du dessus de l'écran dans les machines qui en comportent).
Est	4,20 —	
P.-L.-M	4,26 —	(du dessus de l'écran).
P. O.	4,20 —	(du dessous de l'écran).
Etat	4,20 —	(du dessous de l'écran).
Midi	4,23 —	

La cote de hauteur totale de la cheminée est de 4,30 m. dans les locomotives des chemins de fer de l'*État belge*, de 4,20 m. sur le réseau de la *Méditerranée* (Italie), de 4,30 m. à 4,40 m. en Suisse, de 4,58 m. sur les machines des chemins de fer de l'*État* en Autriche et en Russie, de 4,15 m. sur les chemins badois et de 4,20 m. en Prusse. En Angleterre elle est plus faible que partout ailleurs et varie de 3,95 à 4,02 m. au maximum. Aux États-Unis elle est au contraire plus élevée que dans les autres pays : *Pensylvania RR.* 4,47 m. ; *New-York Central*, 4,53 m. ; *Chicago Milwaukee and Saint-Paul* 4,60 m. ; *Erie* 4,72 m.

La cheminée d'une machine dans laquelle, comme certaines locomotives modernes, l'axe du corps cylindrique se trouve à 2,45 m. au-dessus du rail et dont la boîte à fumée aura un diamètre de 1,60 m., n'aura plus qu'une hauteur extérieure de 0,90 m. à 1,00 m. en France, de 0,75 m. en Angleterre et de 1,35 m. en moyenne aux Etats-Unis ou en Autriche.

Les cheminées de locomotives sont à section circulaire ; les seules exceptions sont présentées par quelques machines à grande grille de l'*Etat belge* (types 6, 12, 25), qui ont été munies de cheminées auxquelles on a donné une section rectangulaire afin que leur section transversale fût augmentée sans accroître leurs dimensions, pour obtenir un tirage plus doux nécessaire avec le genre de combustible et le mode de chauffe usités. Cette disposition a, croyons-nous, été abandonnée pour les constructions neuves.

La forme et, entre des limites raisonnables, le diamètre des cheminées, n'a pas grande influence sur le fonctionnement; aussi ne doit-on pas s'étonner de la diversité des proportions qui sont adoptées par les différentes administrations. La hauteur ne semble pas non plus avoir grande influence, les minuscules cheminées des locomotives anglaises ne paraissent pas réduire le tirage ; elles doivent être cependant à la limite. On a essayé

toutes les formes de cheminées, depuis la forme cylindrique jusqu'aux formes tronconiques plus ou moins accentuées, disposées dans les deux sens. La *Compagnie de l'Ouest* n'a employé pendant longtemps que des cheminées cylindriques ; il en est de même de la *Compagnie de Lyon* et de plusieurs Compagnies anglaises (*Great Western*, *South Western*, *Brighton*); les cheminées tronconiques avec le petit diamètre à la base sont, aujourd'hui, de beaucoup les plus répandues. En Allemagne, la différence entre les deux diamètres est très accentuée, ce qui accroît l'entraînement des escarbilles, nous l'avons vu précédemment, et est en outre d'un aspect peu gracieux.

Certains ingénieurs constituent la cheminée de deux troncs de cône superposés par leur petite base placée à peu de distance du bas de la cheminée, le cône inférieur étant beaucoup moins haut que l'autre ; il est d'ailleurs dissimulé par l'embase de la cheminée (*Est*, *Etat prussien*).

Actuellement, aussi bien en ce qui concerne la plus grande partie de l'Europe que les Etats-Unis, à part les quelques exceptions signalées, on peut poser en principe que les cheminées de locomotives sont normalement ou cylindriques, ou légèrement tronconiques, la grande section se trouvant en haut. On en verra de nombreux exemples dans les figures qui accompagnent cet ouvrage.

Il est nécessaire, pour que le tirage s'effectue convenablement, avec la perte de charge minimum, de raccorder la base de la cheminée avec la capacité intérieure de la boîte à fumée au moyen de courbes arrondies (fig. 400) ; on ne s'en dispense quelquefois qu'afin d'augmenter la hauteur de la partie cylindrique ou conique de la cheminée, qu'un grand congé réduit toujours. La portion de la boîte à fumée placée au-dessus de la rangée supérieure des tubes peut être à la rigueur considérée comme formant un espace mort et on a de plus en plus tendance, pour augmenter la hauteur de la cheminée, à la prolonger à l'intérieur de la boîte, soit sans changer sa forme, soit en la terminant par une portion en forme de cône dont le centre correspond à celui de la tuyère d'échappement, la face supérieure de celle-ci correspondant au plan inférieur de ce cône. La hauteur réelle de la cheminée se trouve ainsi plus grande de 0,30 m. à 0,45 m. que sa hauteur apparente extérieure, et l'adoption du cône semble favorable au tirage. Cette disposition est aujourd'hui adoptée par les *Compagnies de l'Ouest*, du *Nord* et de l'*Est*, par beaucoup de lignes anglaises, etc. Le cône se fait en tôle mince ou en fonte ; dans ce dernier cas, il est parfois comme au *North Western*, (figures du paragraphe consacré à l'étude des appareils de la boîte à fumée), à génératrices courbes, ce qui est un peu plus satisfaisant au point de vue de la réduction des pertes de charge. Ce cône n'est pas nécessairement de section circulaire ; la cheminée se trouve souvent trop près de la plaque

tubulaire pour que l'on puisse lui donner une forme régulière ; il se trouve alors aplati vers l'arrière et la section est elliptique.

Les cheminées se font en tôle ou en fonte. Dans le premier cas (fig. 405) elles se composent d'une partie cylindrique ou conique formant le corps de la cheminée et d'une partie emboutie de section circulaire ou parfois, à la base d'attache sur la boîte à fumée, rectangulaire ou carrée. Cette embase est boulonnée sur un cadre de même forme rivé sur la boîte à fumée (fig. 400). Quand la cheminée se prolonge vers le bas, elle est fixée par une cornière cintrée que dissimule une embase légère formant enveloppe (fig. 405 à 410). Dans les machines allemandes et américaines, l'embase est souvent en fonte et se fixe soit sur la face supérieure, tournée, d'un socle de même métal solidaire de la boîte à fumée (fig. 411) (1), soit directement sur la boîte à fumée.

Le corps de la cheminée est formé par une tôle cintrée dont l'épaisseur (5 à 6 mm.) est supérieure à ce qui serait simplement nécessaire en vue de la résistance seule. La cheminée est une des parties de la locomotive qui s'use le plus vite par suite du frottement des produits gazeux et des escarbilles entraînées par l'échappement, et en raison de la rapide corrosion provenant de l'humidité de ses parois intérieures. Aussi, importe-t-il de lui donner une épaisseur suffisante pour que le remplacement ne s'impose pas trop fréquemment. Les deux lèvres de la tôle cintrée sont reliées par un petit couvre-joint intérieur rivé à froid.

Le remplacement fréquent de la cheminée nécessite sa fixation à l'aide de boulons facilement démontables. Les embases ordinaires en tôle emboutie ou en fonte se fixent sur la boîte à fumée par une rangée de boulons de 12 à 15 mm. Dans certaines machines construites en Allemagne et aux États-Unis et par quelques constructeurs anglais pour les colonies, le joint de la cheminée se fait à plat sur une partie en fonte fixée à la boîte à fumée, comme nous l'avons dit plus haut, au moyen de quatre boulons placés aux angles permettant, par leur petit nombre, un démontage rapide; mais cet assemblage est massif et disgracieux (fig. 174 et 179).

Depuis quelques années, l'usage de la fonte, pour la confection des cheminées, s'est beaucoup répandu ; il est général en Angleterre et très usité en Allemagne et aux États-Unis. Ce métal, auquel on donne une épaisseur de 12 à 18 mm., minimum que permettent les conditions de la fonderie, résiste beaucoup plus longtemps que la tôle à l'action corrosive des eaux grasses et sales et au frottement des escarbilles ; il donne en outre quelques facilités de construction en supprimant les parties embouties et devient économique pour les administrations qui ont peu de types et peuvent avoir en approvisionnement des cheminées faites sur le même modèle, s'appliquant aux diverses classes de machines : c'est le cas des Compagnies anglaises. D'autre part, la fonte donne, sur la tôle, un grand excédent de poids et

doit s'appliquer surtout aux cheminées de faible hauteur. On trouvera, figures 411 et 412, plusieurs exemples de cheminées en fonte.

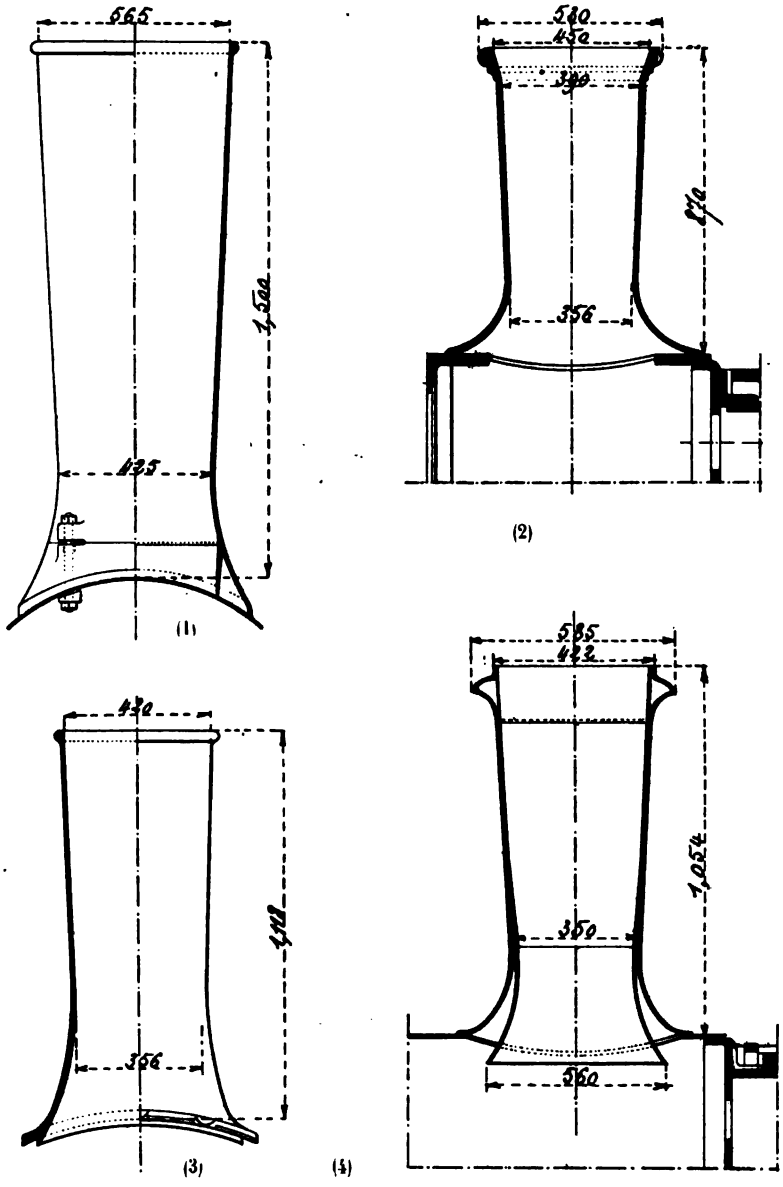


Fig. 411. — Types de cheminées en fonte.

(1) *Baltimore and Ohio;* (2) *Manchester Sheffield and Lincolnshire;* (3) *Chicago and North Western;* (4) *Cape Government.*

La partie supérieure de la cheminée doit être au moins raidie par un boudin demi-circulaire, formé d'un fer demi-rond tenu par de petits rivets, quand la cheminée est en tôle, d'un boudin ou d'une nervure venus de fonte

quand la cheminée est elle-même en fonte. Beaucoup de constructeurs rapportent à la partie supérieure, ou font venir de fonte avec la cheminée, un chapiteau qui passe pour améliorer un peu le tirage en créant une dépression du courant d'air, lorsque la machine est lancée à grande vitesse, facilitant la sortie des gaz et de la vapeur, mais dont le but est avant tout décoratif. Ce chapiteau se fait en fonte ou en bronze, en laiton ou en cuivre emboutis; on en trouvera de nombreux exemples figures 73 à 147 ; 405 et 412.

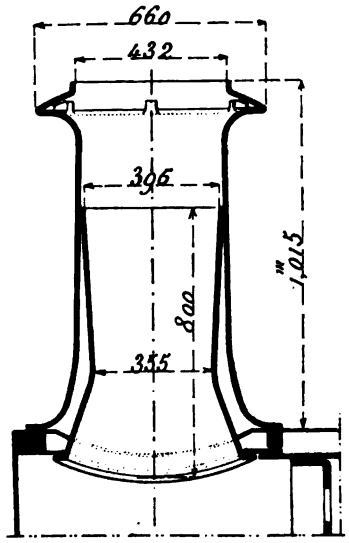


Fig. 412. — Cheminée en fonte du *Midland Railway*.

En France et sur le continent européen en général (à part l'*État belge*) on a presque partout renoncé à cet accessoire; mais les Anglais, qui tiennent beaucoup à l'aspect de leurs machines, l'ont maintenu. Il en est de même de quelques Compagnies américaines.

Les cheminées des machines — tout au moins des express — de plusieurs administrations françaises (*P.-L.-M.*, *P.-O.*, *Etat*) portent à leur partie supérieure et sur l'avant un écran, formé par un demi-cylindre en tôle ayant une hauteur de 0,05 m. à 0,10 m., qui peut tourner autour d'une charnière horizontale de manière à être, à volonté, rabattu ou relevé (fig. 19 à 25). Cet écran, quand il est dans cette dernière position, a pour but de créer un vide partiel derrière lui quand la machine est en vitesse et d'empêcher le courant d'air de gêner l'échappement des gaz en haut de la cheminée. Il a l'inconvénient de produire l'effet contraire quand la machine marche tender en avant, l'air s'engouffrant au contraire dans la cheminée, si on oublie de l'abaisser, ce qui peut arriver. L'écran s'applique surtout aux locomotives express, en raison de la plus grande vitesse à laquelle elles circulent et parce que ces machines marchent toujours, normalement, cheminée en avant. La *Compagnie du Nord* a placé de semblables écrans, mais moins haut et fixes, au sommet des cheminées de ses locomotives à grande vitesse (fig. 8 à 10).

Un autre accessoire de la cheminée, à peu près spécial à la France et aux seules contrées qui ont demandé à nos constructeurs leurs premières locomotives ou ont imité notre pratique, consiste dans le *capuchon* (fig. 19, 23, 30, etc.), formé d'une tôle circulaire, pouvant pivoter à la main du mécanicien autour d'une tringle verticale et qui sert à obstruer la cheminée quand elle est au repos, ce qui supprime le tirage et permet au feu de couver sans dépense sensible. Cet accessoire n'a plus de but avec les machines dont les

cendriers sont munis de portes permettant de supprimer complètement l'accès de l'air sous la grille. Quelques Compagnies, celles de *Lyon* et d'*Orléans*, l'ont cependant maintenu, d'autres l'ont abandonné — du moins pour des machines munies de cendriers clos, — après l'avoir usité ; la Compagnie de l'*Ouest* ne l'a jamais employé.

Les cheminées à enveloppe sont usitées en Angleterre et par quelques réseaux américains. L'enveloppe extérieure est protégée par la chemise intérieure ; la peinture y adhère mieux et n'est pas abîmée par la chaleur. L'enveloppe intérieure s'use seule rapidement et se remplace à peu de frais. On trouvera, figure 412, une coupe de la cheminée adoptée par le *Midland Ry* pour toutes ses machines. Les deux enveloppes sont en fonte. Au *Highland Ry*, l'enveloppe extérieure est percée sur l'avant d'ouvertures oblongues en forme de persiennes qui permettent à l'air extérieur de pénétrer à l'intérieur de la chemise et de rafraîchir la cheminée dans le but de préserver la peinture.

La *Compagnie d'Orléans* emploie, depuis quelques années, des cheminées à charnière (fig. 413). La penture est placée entre le corps et l'embase et permet, par un simple rabattement, qui se produit obliquement à cause de la présence du dôme placé dans le voisinage de la cheminée, de faire facilement la visite, le nettoyage de la tuyère d'échappement et de ses soupapes, ainsi que de la couronne du souffleur. Cette disposition n'a de raison d'être que dans les locomotives où, comme dans celles de la Compagnie en question, la tuyère d'échappement se trouve engagée à l'intérieur de la cheminée.

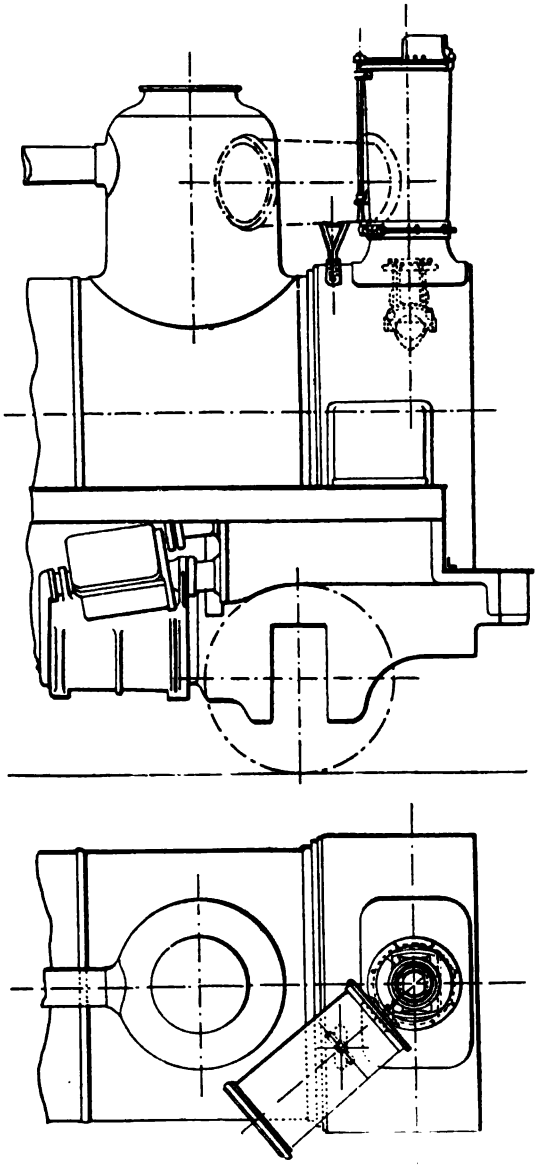


Fig. 413. — Cheminée à charnière (*Orléans*).

Nous ne parlerons pas pour le moment des cheminées à chicanes pare-

étincelles (*diamond-stacks*, etc.) à une époque si usitées en Amérique, en Russie et dans quelques contrées de l'Europe du Nord, mais qui, aujourd'hui, sont presque partout abandonnées pour la boîte à fumée prolongée. On en trouvera un très grand nombre de systèmes décrits et reproduits dans *La Chaudière locomotive*, de M. G. Richard.

On trouvera plus loin un grand nombre d'exemples de cheminées dans le paragraphe consacré à l'examen de la boîte à fumée.

209. Voûtes en briques. — Les voûtes en briques se construisent ordinairement en briques crues de kaolin; les joints, aussi minces que possible, sont remplis d'un coulis de même matière; parfois les briques sont reliées par de la terre argileuse réfractaire. On doit s'attacher à composer la voûte d'un nombre aussi faible que possible de briques, ce qui est favorable à sa durée. Ces briques présentent la forme nécessaire pour constituer un berceau cylindrique, leurs deux faces longitudinales sont convergentes. Quelques Compagnies composent la voûte de briques très peu nombreuses, parfois trois seulement, taillées d'avance et arrondies en haut et en bas et reposant l'une sur l'autre par des redans (fig. 251, 252). Ces briques ne passant pas par la porte du foyer, on est obligé de démonter un certain nombre de barreaux de grille pour monter la voûte, ce qui d'ailleurs est un bien petit inconvénient.

La voûte est supportée de chaque côté sur un sommier en fer placé le long de la paroi du foyer, à l'intérieur, incliné de l'avant à l'arrière de la quantité voulue et reposant lui-même sur des tasseaux solidaires de vis pénétrant dans les flancs du foyer ou sur les têtes carrées des vis elles-mêmes.

Aux États-Unis, on emploie fréquemment, sinon la voûte proprement dite, du moins l'écran en briques réfractaires supporté par des tubes à eau qui relient la plaque tubulaire, dans la région située au-dessous de la rangée inférieure des tubes, au ciel du foyer vers l'arrière ou à la lame d'eau postérieure, au-dessus de la porte. Ces tubes favorisent la circulation de l'eau et ne présentent d'autre inconvénient que de compliquer un peu la construction, les joints des tubes sur les plaques demandant à être étudiés et installés avec un grand soin (voir fig. 316).

Une disposition analogue a été appliquée à de nombreuses locomotives des chemins de fer de l'*État français* (fig. 253), mais avec cette différence assez importante que les briques, au lieu de se trouver dans un même plan, forment une sorte de V et ne laissent que 0,060 m. d'espace libre de chaque côté contre les plaques et de 0,150 m. sous le ciel. Cet écran partage ainsi la boîte à feu en deux compartiments dont l'un forme chambre de combustion. Il repose sur six tubes en acier soumis directement au coup de feu et dans lesquels s'établit une énergique circulation.

210. Bouilleur Ten Brinck. — Nous avons donné plus haut (§ 74) quelques renseignements sur les bouilleurs Ten Brinck ; nous les complétons par le

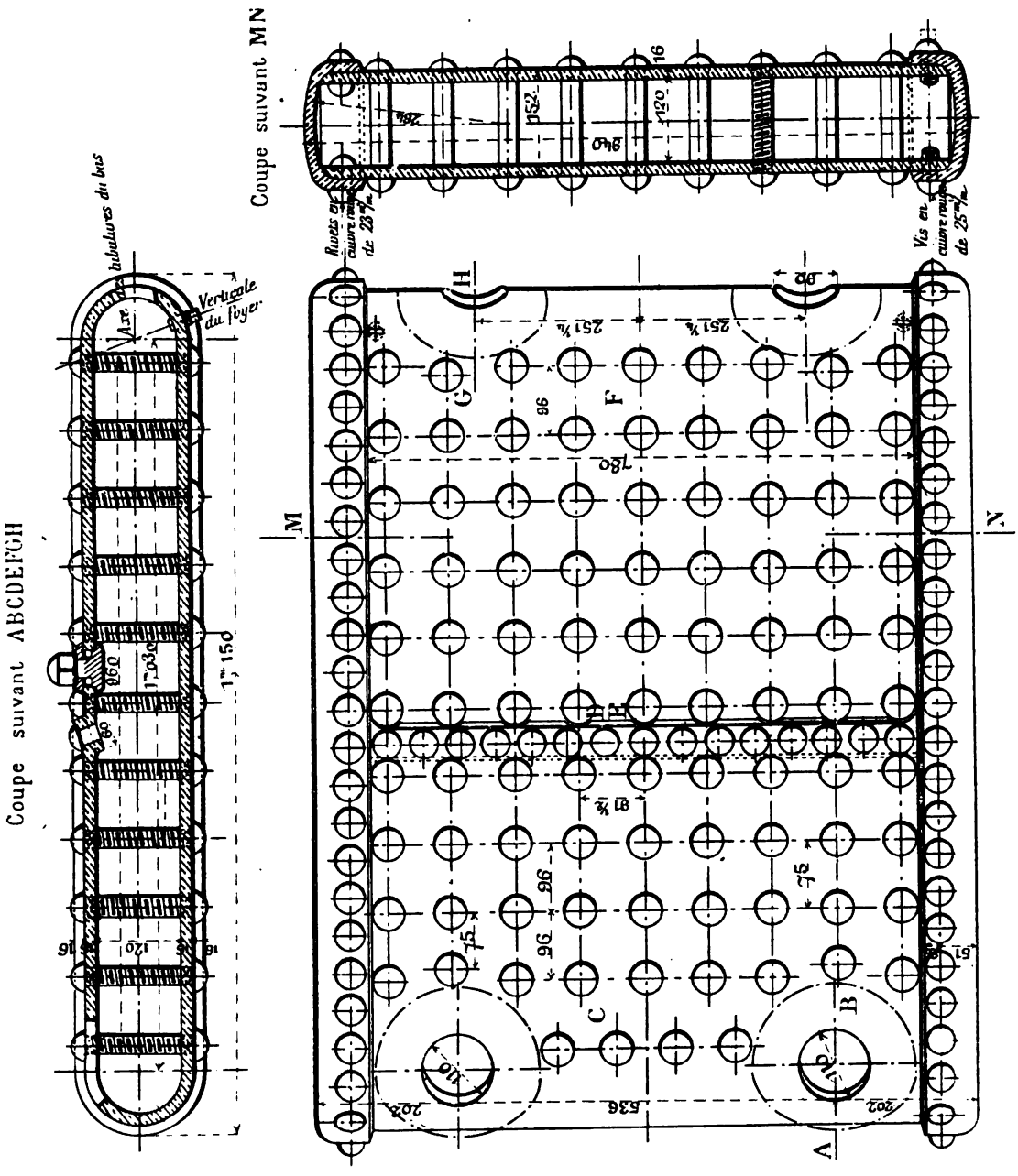


Fig. 414. — Bouilleur *Ten Brinck* (*Chemin de fer d'Orléans*).

dessin d'un de ces appareils, en cuivre rouge, tels qu'ils sont appliqués aux locomotives de la Compagnie d'*Orléans* (fig. 414).

211. Autoclaves et bouchons de lavage. — Les chaudières comportent des ouvertures, dont les lèvres sont consolidées par des renforts rivés et qui, normalement fermées, servent à opérer et faciliter le lavage de la chaudière

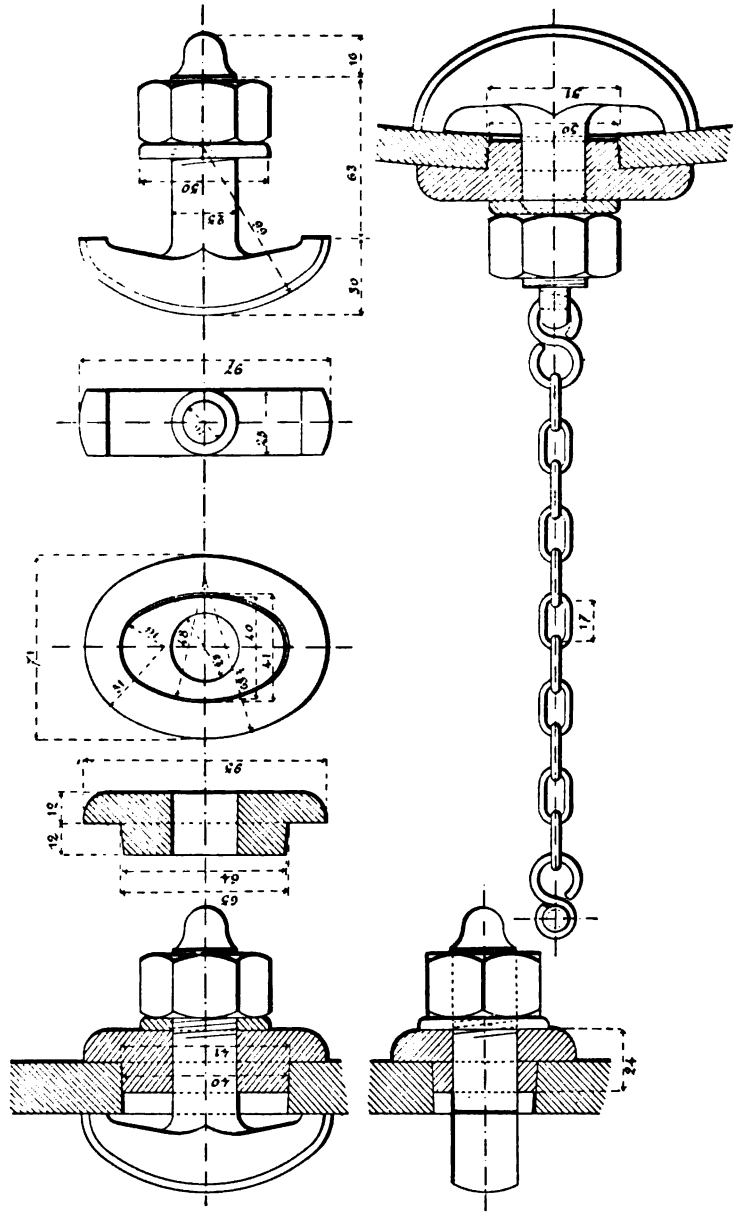


Fig. 415. — Autoclaves de la face avant, de la face arrière et de la plaque tubulaire avant. *Chemins de fer de l'Est* (Mach. à grande vitesse du type 800).

dans les dépôts ; elles sont en outre munies d'un gros robinet de vidange placé au point le plus bas de la boîte à feu immédiatement au-dessus du cadre. Quand ce dernier est horizontal, le robinet de vidange peut être placé

sur une quelconque des faces de la boîte à feu ; quand il est incliné, ce robinet se trouve situé à l'avant.

Les trous de lavage sont ordinairement fermés par des bouchons autoclaves dont on trouvera des exemples figure 415. On en place généralement un à chaque coin du foyer, immédiatement au-dessus du cadre, et un autre au bas de la plaque tubulaire de la boîte à fumée.

Aujourd'hui, il est aussi d'usage de placer sur les côtés de la boîte à feu, souvent dans les parties arrondies quand le foyer est du type Belpaire, des regards servant pour le lavage des entretoises des tirants et du ciel de foyer. Certaines machines comportent en outre, au bas de la plus grande virole du corps cylindrique, une poche de vidange munie d'un robinet ou d'un autoclave.

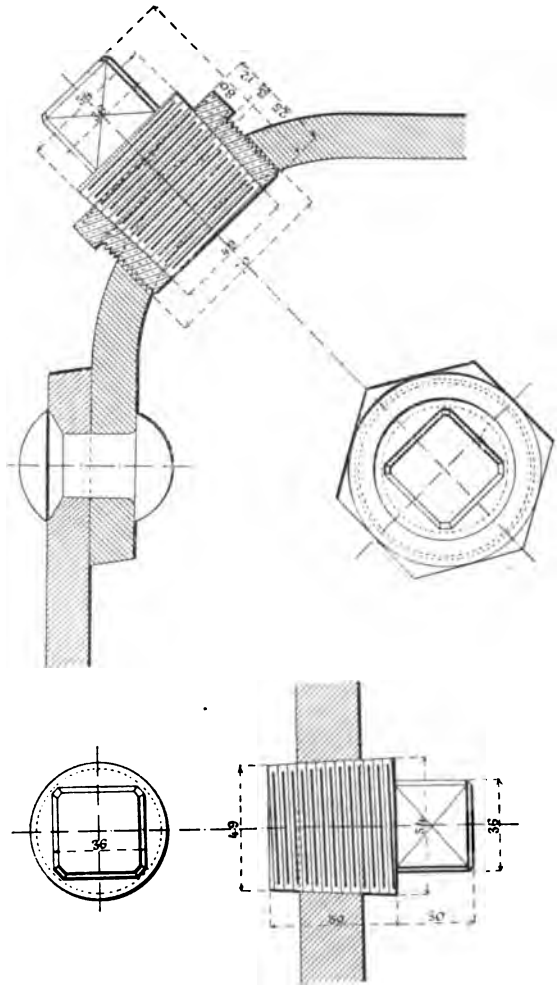


Fig. 416. — Types de bouchons de lavage coniques et filetés (*Central Suisse*).

Certains constructeurs remplacent les autoclaves par des bouchons coniques à vis ; on trouvera, figure 416, la disposition de ces bouchons dans les nouvelles locomotives construites par la *Société alsacienne* pour la Compagnie du *Central Suisse*. Ces bouchons tiennent moins de place et nécessitent des trous de diamètre plus petit, affaiblissant moins la chaudière. Il est parfois à craindre que, pendant les lavages, les particules de tartre entraînées par le courant d'eau ne viennent se déposer dans les filets et ne gênent pour le remontage des bouchons. On doit nettoyer le taraudage avant de remettre ceux-ci en place.

212. Attache de la chaudière sur le châssis. — La chaudière doit être fixée au châssis sur lequel elle repose, mais sans que celui qui est, suivant l'expres-

sion pittoresque de M. Couche, « gardien de l'invariabilité des axes, » soit

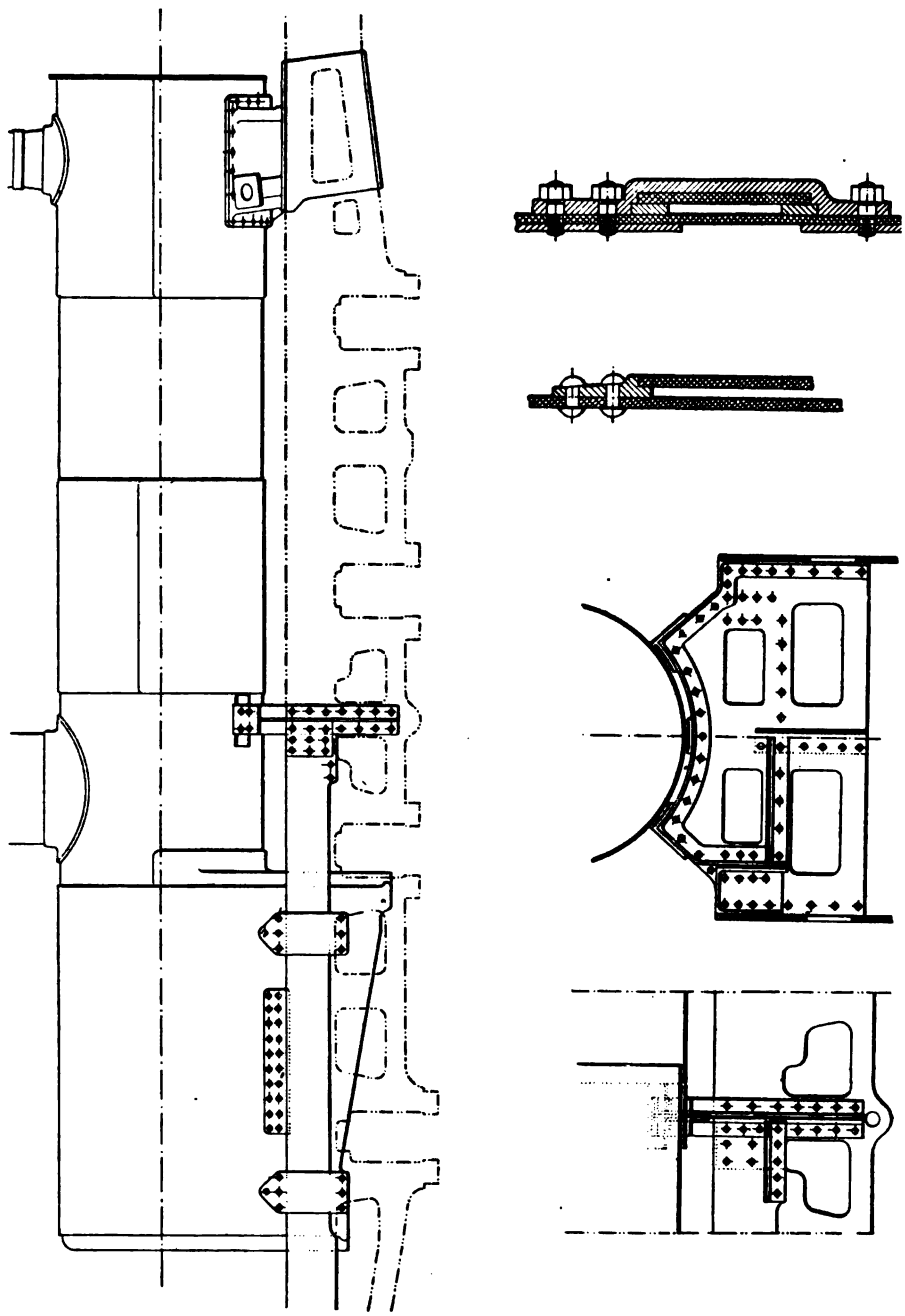


Fig. 417. — Schéma d'ensemble montrant le mode d'attache de la chaudière sur le châssis (*Chemins de fer de l'Est*, machines de banlieue 729-742). Dans le cas considéré, les longerons sont extérieurs; on a disposé un support intermédiaire sous la première virole du corps cylindrique.

soumis, sous l'action des dilatations de la chaudière, à aucun effort parasite susceptible d'entraîner des déformations momentanées ou permanentes.

Pour ménager la dilatation de la chaudière, on ne la fixe d'une manière rigide qu'à une extrémité, l'autre étant simplement guidée sur les côtés et pouvant coulisser sur les longerons. C'est toujours l'avant que l'on choisit pour établir cette fixation et cela pour différentes raisons. Les cylindres, quand ils sont intérieurs, ou les robustes entretoises qui les relient quand ils sont extérieurs, constituent un point d'attache des plus robustes. Les tuyaux de vapeur et d'échappement se trouvent à l'intérieur de la boîte à fumée ou dans son voisinage, et exigent, pour que les joints ne perdent pas, une liaison rigide entre la chaudière et les cylindres. La disposition de la boîte à fumée permet en outre une attache facile avec le châssis.

A notre connaissance, certaines machines Crampton, attachées au châssis par leur boîte à feu, ont seules fait exception à cette règle, mais les cylindres n'étaient pas à l'avant.

La figure 417 montre la disposition générale des attaches de la chaudière sur le châssis (machines de banlieue de la Compagnie de l'*Est*). La boîte à fumée est boulonnée à l'avant sur le massif des cylindres qui sont intérieurs ; à l'arrière, elle peut coulisser sur le dessus des longerons par l'intermédiaire d'une glissière qui est rivée sur le côté de la boîte à feu, au milieu. Deux agrafes, placées l'une à l'avant et l'autre à l'arrière de cette glissière, établissent la liaision transversale. Une entretoise intermédiaire, placée à quelque distance en avant du foyer, supporte le corps cylindrique par l'intermédiaire de cales rabotées ; quand ces cales reçoivent des boulons, leurs trous doivent être ovalisés afin de permettre la libre dilatation.

Dans l'immense majorité des cas, on se dispense aujourd'hui de ce support intermédiaire dont l'utilité ne semble pas grande, le moment d'inertie de la section transversale du corps cylindrique étant plus que suffisant pour que, supporté par ses extrémités, il ne fléchisse jamais.

La plupart des Compagnies françaises ont employé le support intermédiaire, mais elles y renoncent peu à peu, surtout pour celles des locomotives qui ont des corps cylindriques de faible longueur.

Fixation de la boîte à fumée. — Quand les cylindres sont intérieurs, ils portent, à leur partie supérieure, une bride venue de fonte, offrant en plan une forme rectangulaire et dont la face dressée présente une courbure de même rayon que la boîte à fumée qui s'y applique et s'y trouve fixée par une rangée de boulons. Ce sont souvent les boîtes à tiroir elles-mêmes qui forment le support comme on le verra figures 404 à 407.

Quand la boîte à fumée est en saillie sur le corps cylindrique, la fixation de la chaudière s'effectue principalement par la plaque tubulaire dont la partie inférieure, dressée, s'appuie sur un redan mortaisé sur le haut d'une nervure transversale formant la continuation des plateaux de cylindres; c'est

la disposition usuelle (fig. 410). Cette plaque est attachée par des boulons ou des prisonniers.

Si les cylindres sont extérieurs, la boîte à fumée, quand elle est cylindrique, repose sur une sorte de ber en tôles et cornières faisant partie du massif entretoisant les cylindres (fig. 418). Dans les locomotives américaines ce support est constitué par une pièce en fonte, creuse, appelée *saddle*, qui sert à relier les deux cylindres et contient les conduits d'arrivée et d'échappement de vapeur (fig. 206, 207, 424).

Quand la boîte à fumée est en saillie elle se termine ordinairement, à la partie basse, par un cadre en cornière, horizontal, qui vient reposer et se river sur une tôle placée à plat au-dessus des longerons auxquels elle est elle-même rivée et sert de fond à la boîte (fig. 403 et 404).

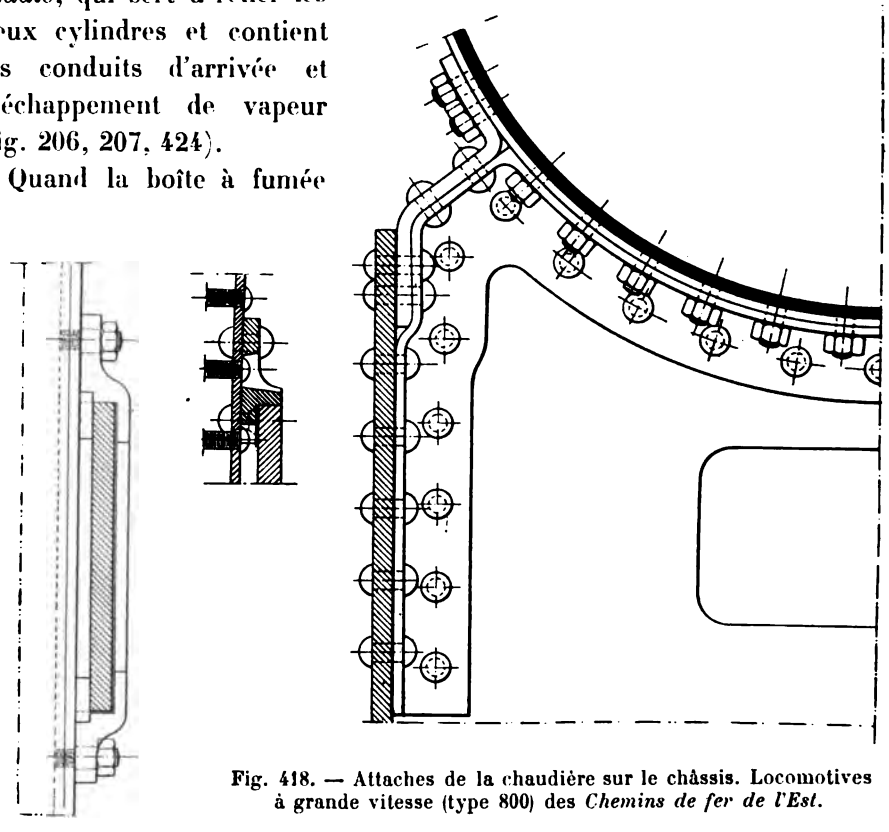


Fig. 418. — Attaches de la chaudière sur le châssis. Locomotives à grande vitesse (type 800) des *Chemins de fer de l'Est*.

L'assemblage de la chaudière sur le châssis doit être démontable et on l'établit à l'aide de boulons ou de goujons.

Quand les brides du support de la chaudière sont accessibles par le dehors (fig. 418), on place les écrous à l'extérieur, mais il ne peut toujours en être ainsi.

Si les écrous sont placés dans la boîte à fumée, ils doivent être borgnes afin de protéger le filetage de l'action destructive du feu ou des suies humides ;

ces écrous sont souvent en bronze, ce qui les rend plus facilement démontables.

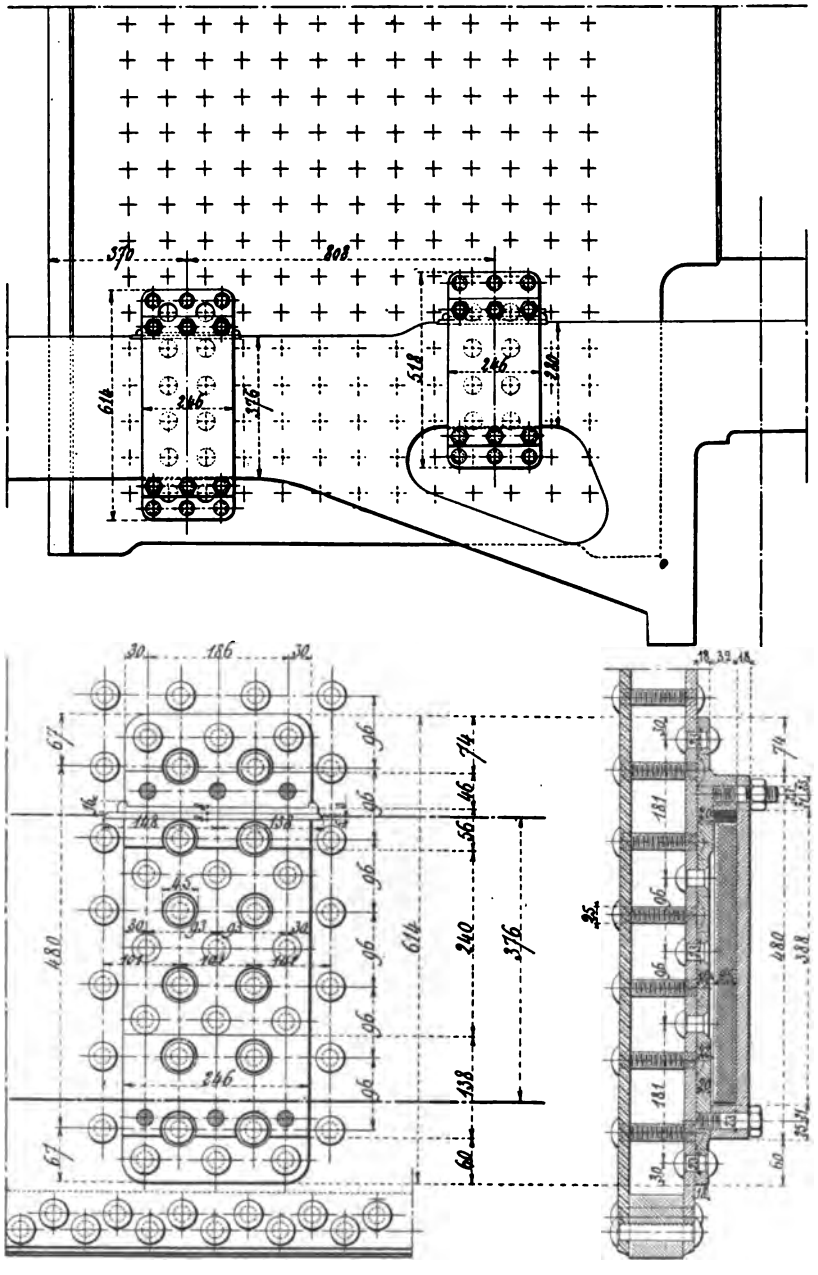


Fig. 419. — Type ordinaire de fixation de la boîte à feu sur le châssis, par glissières et agrafes (*Chemins de fer de l'Ouest* ; machines 2000).

Fixation de la boîte à feu. — La boîte à feu peut être fixée par plusieurs procédés, d'ailleurs analogues, dont nous donnerons des exemples.

Le premier (fig. 419) est emprunté aux locomotives à marchandises de la Compagnie de l'*Ouest* (série 2000), auxquelles du reste il n'est pas particulier.

La boîte à feu est supportée, de chaque côté, sur les longerons, en deux

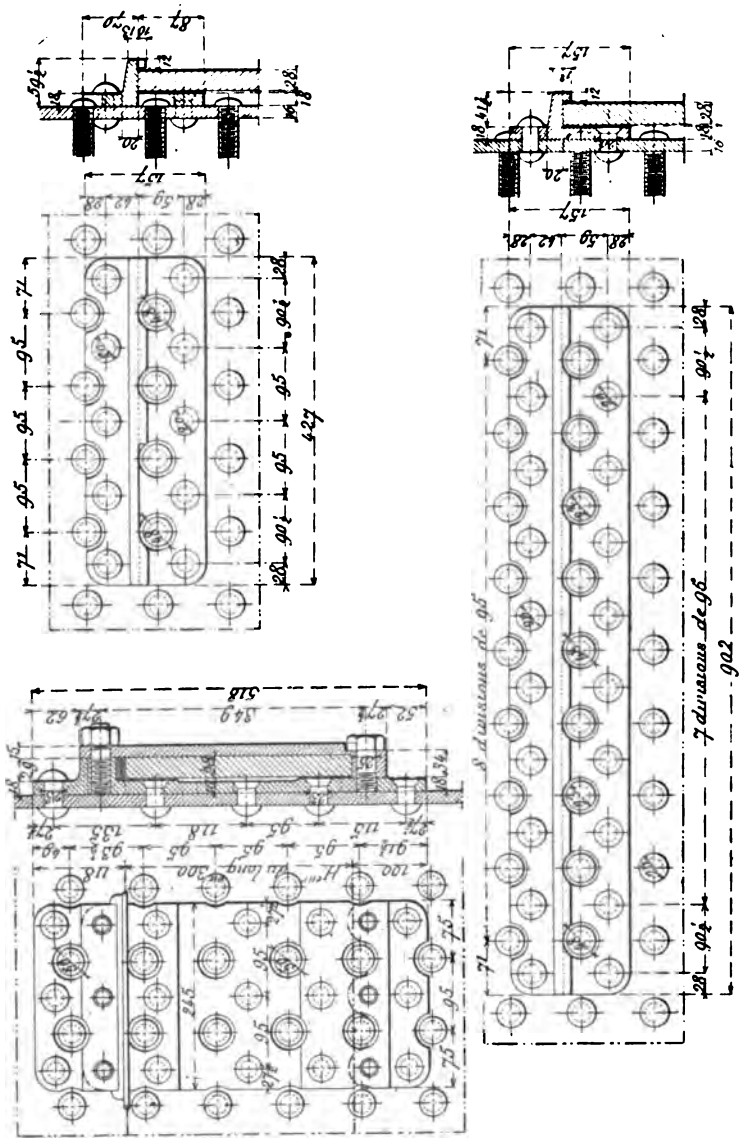


Fig. 420. — Détail des plaques et agrafes de fixation de la boîte à feu sur les longerons (*Chemin de fer du Nord*, machines à grande vitesse 2121-2157).

points, par des platines rapportées dont le dessin indique suffisamment le mode de construction pour nous dispenser d'une description détaillée. Pour éviter l'action de l'usure, on fait porter les supports sur des semelles frottantes en acier, rapportées, les unes sur le dessus des longerons, les autres

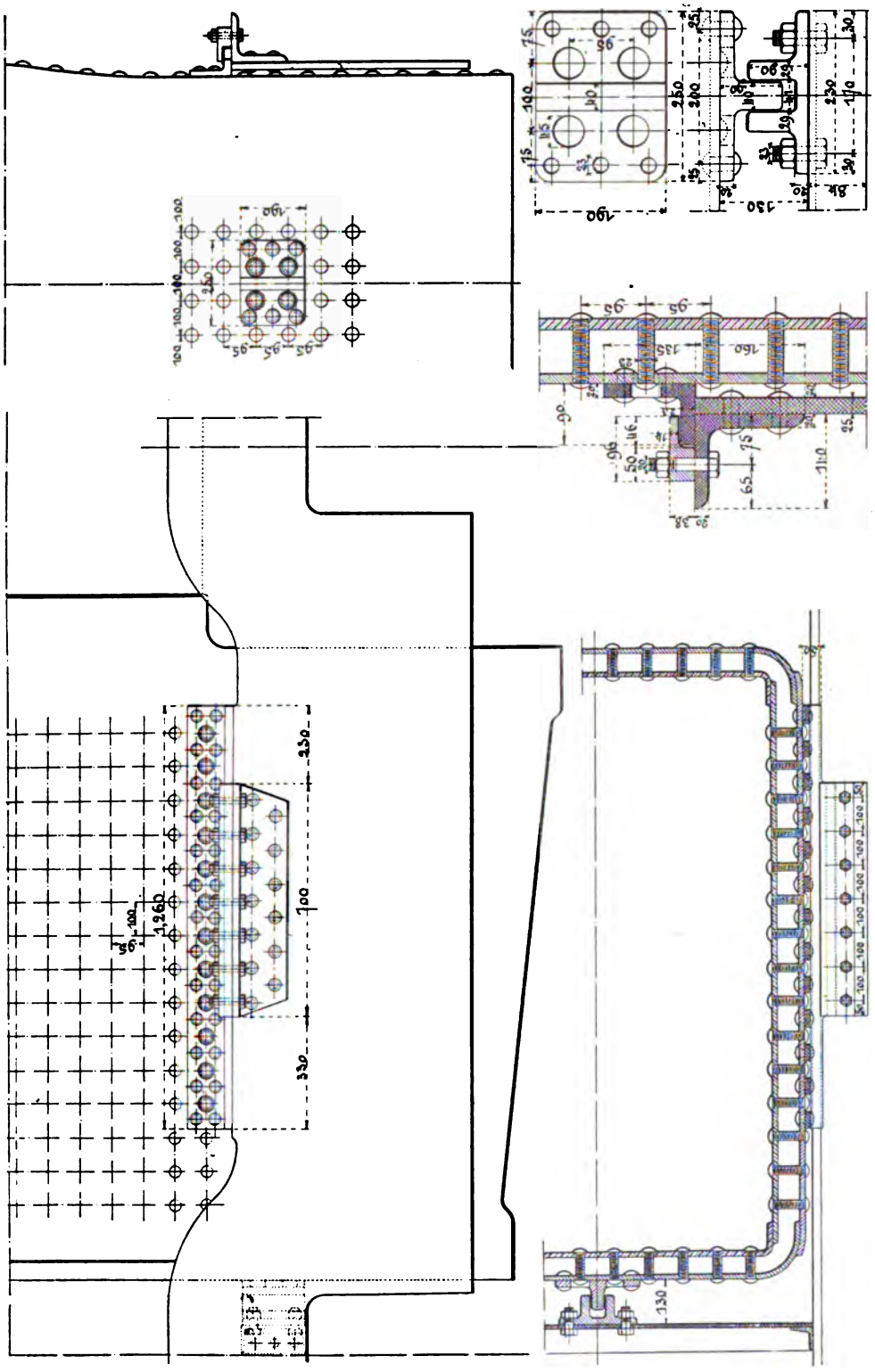


Fig. 421. — Attache de la boîte à feu sur le châssis pour machines dans lesquelles le foyer descend entre deux essieux accouplés (*Chemins de fer de l'Ouest* : machines à grande vitesse 963-990).

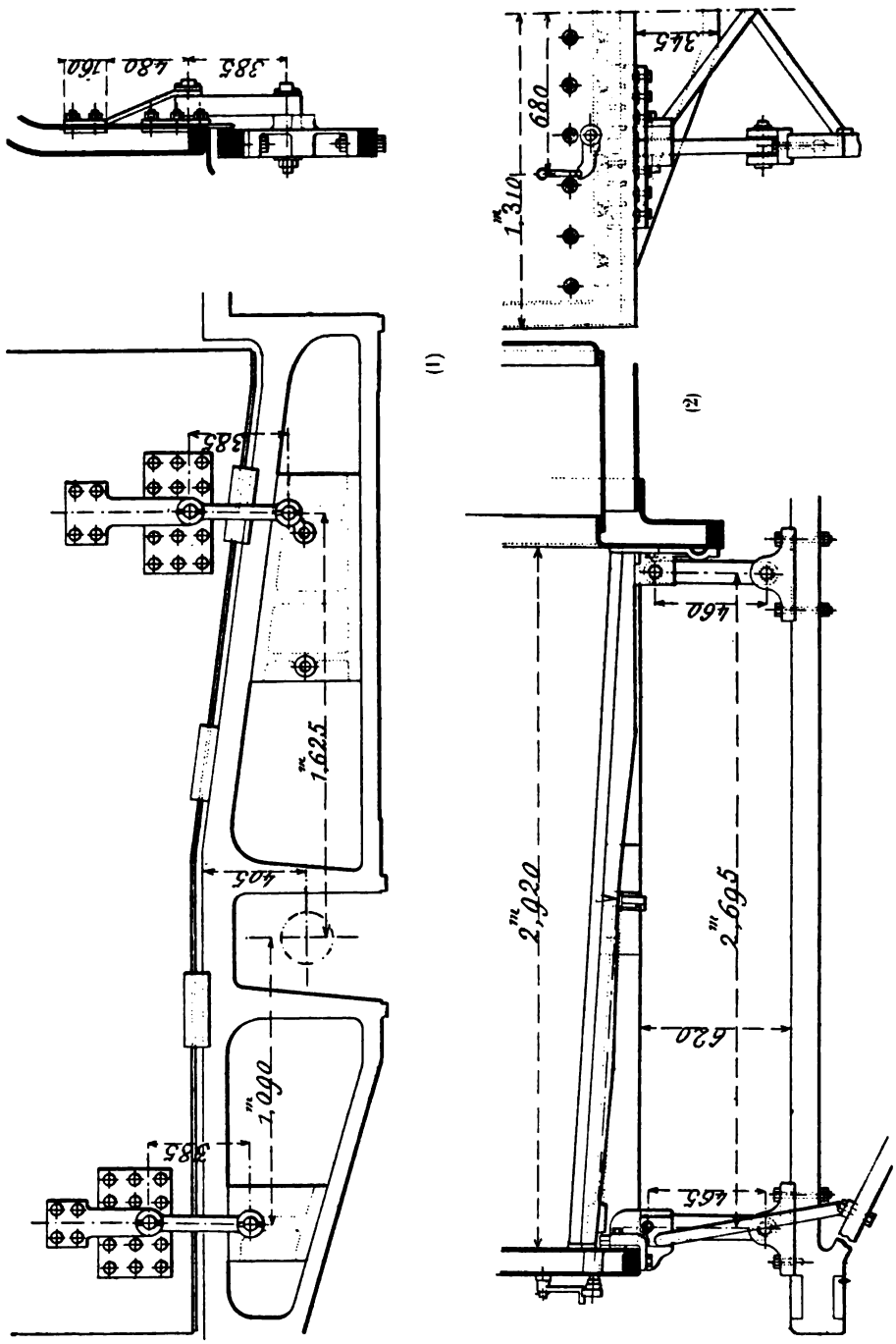


Fig. 122. — Fixation du foyer sur le châssis par des bielles articulées ; dispositions américaines : (1) pour foyer ordinaire ; (2) pour foyer Wootten débordant les roues.

au-dessous des supports. Les premières sont assemblées à queue d'aronde, les autres sont maintenues et entraînées à l'aide de deux talons.

Les supports présentent une partie verticale, rivée à la boîte à feu et

dressée en haut et en bas, qui sert à guider la chaudière entre les longerons et à la maintenir transversalement. On ne laisse, entre ces portions rabotées et l'intérieur du longeron, de chaque côté, qu'un jeu très minime. L'assemblage est complété par une plaque extérieure maintenue par deux boulons en haut en bas aux bossages du support et qui embrassent le longeron. Grâce à ces plaques extérieures, les longerons se trouvent entretoisés entre eux par le foyer; châssis et chaudière sont parfaitement reliés par un système qui n'exclut pas un déplacement relatif dans le sens de la longueur.

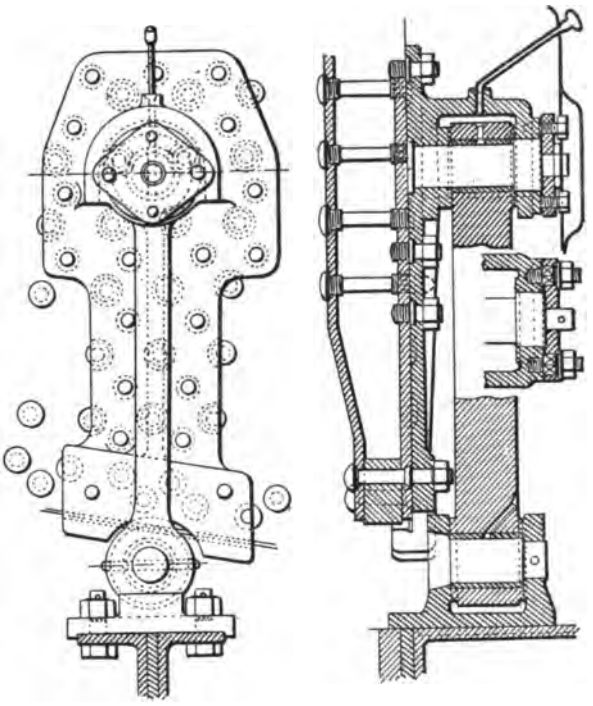


Fig. 423. — Supports articulés du foyer sur le châssis (*État autrichien*).

La figure 420 est relative aux supports de boîte à feu des machines compound à grande vitesse du *Nord*. Deux de ces supports sont placés vers l'avant et vers l'arrière de la boîte à feu, ils se composent simplement d'une glissoire horizontale rivée au foyer reposant sur le dessus dressé du longeron. Entre eux, vers le milieu de la boîte à feu, on place un support-agrafe absolument semblable à celui dont nous avons parlé à propos du précédent mode d'attache. Les supports milieu comportent seuls des plaques extérieures.

On trouvera (fig. 421) la disposition adoptée pour les derniers types de locomotives express de la Compagnie de l'*Ouest* à foyer plongeant (série 953-990); un système semblable est usité par tous les constructeurs anglais. Un support en acier, très long, en forme de cornière, est rivé à la boîte à feu par deux rangées de rivets et vient porter par l'arête supérieure, dressée, des longerons. Sur la moitié environ de sa longueur, au milieu, un guide extérieur le maintient transversalement et empêche son soulèvement éventuel ; ce guide est boulonné à une grosse cornière extérieure rivée sur le longeron. Comme ce genre d'attache est usité pour des locomotives à foyer profond et dont les essieux accouplés sont très espacés (entraxe 3 m.), on peut craindre que les longerons, vers le milieu des points

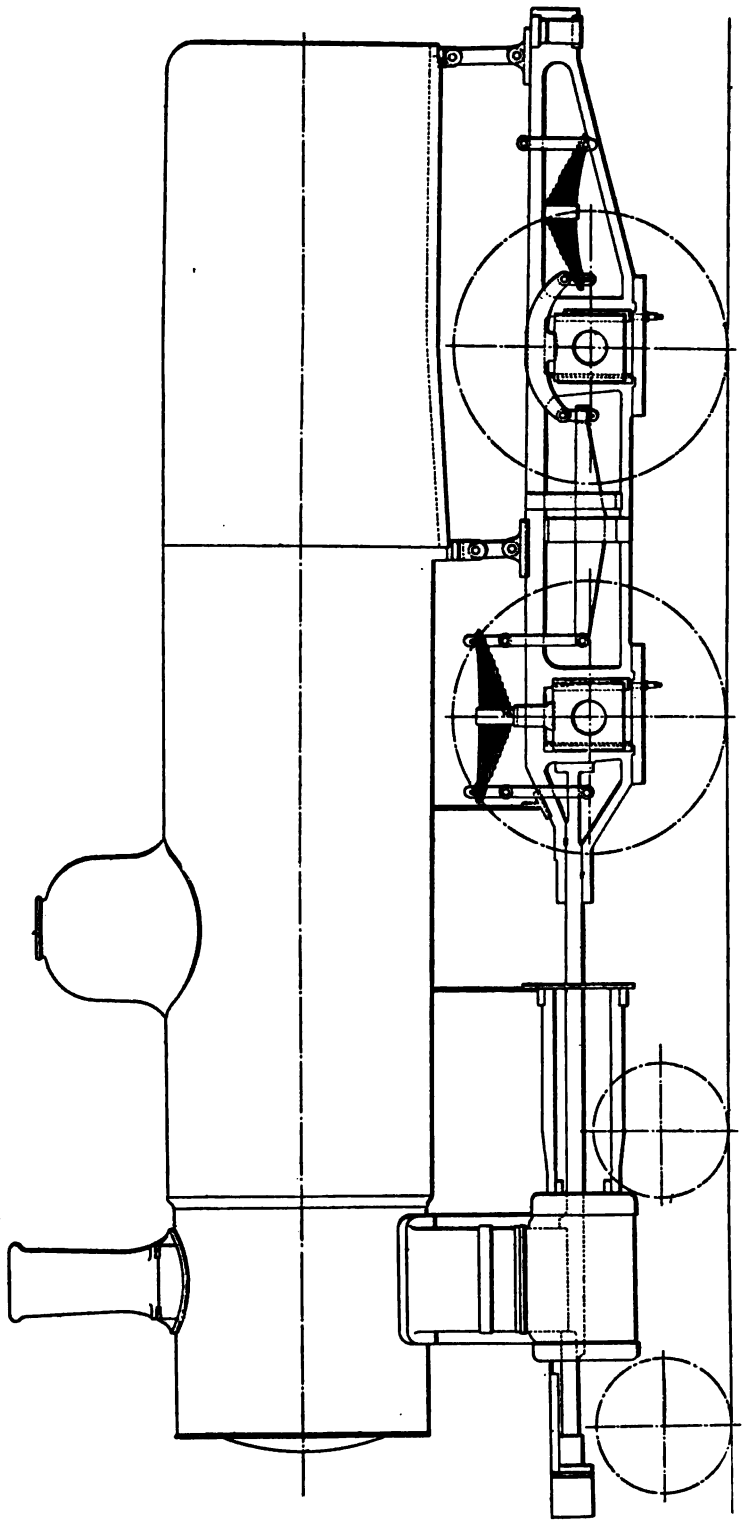


Fig. 424. — Montage, sur le châssis, d'une chaudière à foyer Wootten de locomotive américaine. La boîte à feu, qui déborde les roues, est supportée par des bielles articulées.

d'appui, ne possèdent pas transversalement une rigidité suffisante pour empêcher le fouettement de la chaudière vers l'arrière. Pour éviter cet effet, on les a déchargés du guidage transversal et on a placé à l'arrière de la boîte à feu, vers le milieu, une sorte de patte faisant saillie de quelques centimètres et pénétrant avec jeu à l'intérieur d'une fourche en fer forgé boulonnée à une entretoise des longerons placée dans le voisinage des plaques de garde de l'essieu accouplé. Cet ensemble de dispositions convient aux locomotives à foyer plongeant entre deux essieux accouplés.

Aux États-Unis, on emploie, pour supporter les boîtes à feu sur le châssis, des dispositions assez semblables à celles que nous venons de décrire; mais beaucoup de constructeurs, depuis quelques années surtout, ont adopté les supports à bielle qui se sont d'ailleurs introduits en Europe. A une simplicité incontestable, ce système joint l'avantage de donner lieu à un moindre frottement, le déplacement de la chaudière se faisant facilement sans subir de résistance appréciable ; en outre, il est d'un emploi commode dans les cas où le cadre du foyer doit être placé au-dessus des longerons. On trouvera (fig. 422) (1) un exemple de ce dispositif appliqué à une locomotive américaine construite par les *Schenectady Locomotive Works*. Le foyer est supporté par quatre bielles articulées, d'une part à des tourillons venus de forge avec des plaques rivées à l'enveloppe de boîte à feu et consolidées extérieurement par des arcs-boutants, d'autre part à des axes solidaires des longerons. Ces bielles articulées sont placées sur les côtés, dans le voisinage des extrémités de la boîte à feu. Elles doivent avoir même longueur. Ce système n'offrirait pas, par lui-même, une raideur transversale suffisante et, sous l'action du mouvement de lacet, les bielles et leurs axes seraient rapidement tordus ou brisés. Il est nécessaire d'établir, entre la boîte à feu et les longerons, une liaison transversale qui est obtenue au moyen de petites plaques extérieures, en fer forgé ou en tôle, souvent constituées par le prolongement de l'enveloppe de boîte à feu.

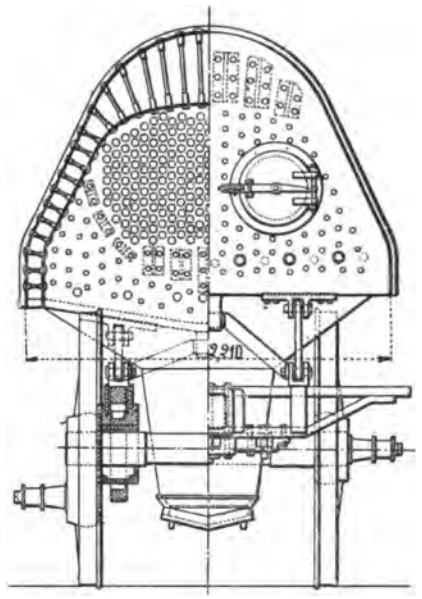


Fig. 425. — Coupe transversale et vue par bout de la machine précédente.

Un système analogue de suspension de foyer a été adopté par la Compagnie de *Lyon* pour ses nouvelles locomotives compound à quatre et huit

roues accouplées. Toutefois, le foyer est suspendu, à l'inverse de la disposition précédente, par des bielles pendantes articulées aux longerons à leur partie supérieure et en bas à la boîte à feu. Les axes des barres de suspension passent dans des œils venus de forge avec le cadre du foyer, en dessous, on se rendra compte de cette disposition par l'examen de la figure 322. Dans les express récentes (C. 21-60), le foyer est simplement suspendu au moyen d'une bielle de chaque côté.

Une disposition analogue est employée par les chemins de fer de l'*État wurtembergois*. Dans quelques machines récentes, les ingénieurs des chemins de fer de l'*État autrichien* ont adopté une disposition voisine du type américain, le cadre du foyer est aussi placé au-dessus des longerons (fig. 423).

On trouvera (fig. 422 (2), 424 et 425) l'ensemble des dispositions de l'attache d'un foyer Wootten américain passant au-dessus des roues accouplées arrière dans une machine express et situé par conséquent à une grande hauteur au-dessus du châssis. La chaudière est maintenue transversalement par des tirants en croix de Saint-André fixés, à la partie basse, au châssis et, à la partie haute, aux pattes d'attache des bielles de support sur le cadre (fig. 422) (2). Ces tirants sont assez longs et assez flexibles, dans le sens de la longueur, pour ne pas s'opposer aux mouvements de dilatation.

ÉVREUX, IMPRIMERIE DE CHARLES HÉRISSEY

3 2044 081 576 696